目　录

第　一　部　分

初　版

1 9 4 8

第　二　部　分

补充的几章

1 9 6 1

导　言

这本书是十多年来我和当时在哈佛医科学校、現在在墨西哥国立心脏学研究所的阿托罗·罗森勃吕特博士共同研究的成果．在那些日子里，罗森勃吕特博士(他是已故的华尔特·皮·堪农博士的同事和合作者)領导了一个每月举行的关于科学方法的討論会．参加者大都是哈佛医科学校的青年科学家，我們一起在日德毕尔特大厅围着圆桌子吃飯．談話是活泼的，毫无拘束的．这可不是一处鼓励任何人或者使任何人有可能摆架子的地方．飯后，由某一个人，或者是我們这个集体中的一員，或者是一位邀請来的客人，宣讀一篇关于某个科学問題的論文，一般地这是一篇其首要思想，或者至少其主导思想是关于方法論問題的論文．宣讀者必須經受一通尖銳批評的夹击，批評是善意的然而毫不客气的．这对于半通不通的思想，不充分的自我批評，过分的自信和妄自尊大真是一剂泻葯，受不了的人下次不再来了．但是，在这些会議的常客中，有不少人感到了这对于我們科学的进展是一个重要而經久的貢献．

并不是所有的参加者都是医生或医学科学家．我們中間有一个人，他是一个非常坚定的成員，对于我們的討論有很大的帮助，这就是曼紐尔·桑陀瓦尔·瓦拉尔塔博士，他和罗森勃吕特博士一样，也是墨西哥人，在麻薩諸塞理工学院当物理教授，他是我在第一次世界大战之后到这个学院来教书时的最初的学生之一．瓦拉尔塔博士常常带領一些麻省理工学院的同事来参加这些討論会，正是在这些討論会的某一次会上，我初次会見了罗森勃吕特博士．我长时期以来就对科学方法很感兴趣，曾經参加过 1911—1913 年間在哈佛由約瑟夫·劳埃斯領导的关于这个題目的討論班；况且，他們感到，有一个能够批判地考虑数学問題的人参加进来，是很重要的，因而我就成了这个集体的积极成員，直到 1944 年罗森

勃吕特博士叫我到墨西哥去而且战时的混乱状态結束了这一系列的討論会为止.

許多年来,罗森勃吕特博士和我共同相信,在科学发展上可以得到最大收获的領域是各种已經建立起来的部門之間的被忽視的无人区.从萊布尼茨以后,似乎再沒有一个人能够充分地掌握当代的全部知識活动了.从那时候起,科学日益成为专門家在愈来愈狹窄領域內进行着的事业.在上一世紀,也許沒有萊布尼茨这样的人,但还有一个高斯,一个法拉第,一个达尔文.今天,沒有几个学者能够不加任何限制而自称为数学家,或者物理学家,或者生物学家.一个人可以是一个拓扑学家,或者一个声学家,或者一个甲虫学家.他滿嘴是他那个領域的行話,知道那个領域的全部文献,那个領域的全部分枝,但是,他往往会把邻近的科学問題看作与己无关的事情,而且認为如果自己对这种問題发生任何兴趣,那是不能容許的侵犯人家地盘的行为.

这些专門化的領域在不断增长,并且侵入新的疆土.結果就象美国移民者、英国人、墨西哥人和俄罗斯人同时侵入俄勒岡州所造成的情形一样——大家都来探险、命名和立法,弄得乱七八糟、糾纏不清.有这样一些科学工作的領域,我們在本书的正文中将要討論到,人們从純粹数学、統計学、电工学和神經生理学等等不同方面来探索它;在这样的領域里,每一个簡单的概念从各方面得到不同的名称;在这样的領域里,一些重要的工作被各方面重复地做了三四遍;可是却有另一些重要工作,它們在一个領域里由于得不到結果而拖延下来,但在邻近的領域里却早已成为古典的工作.

正是这些科学的边緣区域,給有修养的研究者提供了最丰富的机会.同时这些边緣区域也是最最不能用集体攻击和劳动分工这种公認的方法来达到目的的.如果一个生理学問題的困难实质上是数学的困难,那么,十个不懂数学的生理学家的研究成績会和一个不懂数学的生理学家的研究成績完全一样,不会更多.如果一个不懂数学的生理学家和一个不懂生理学的数学家合作,那么,这个人不会用那个人所能接受的术語表达自己的問題,那个人也不

能用这个人所懂得的任何形式来作出自己的回答．罗森勃吕特博士一直坚持主张，到科学地图上的这些空白地区去作适当的查勘工作，只能由这样一羣科学家来担任，他們每人都是自己領域中的专家，但是每人对他的邻近的領域都有十分正确和熟練的知識；大家都习于共同工作，互相熟悉对方思想习慣，并且能在同事們还沒有以完整的形式表达出自己的新想法的时候就理解这种新想法的意义．数学家不需要有領导一个生理学实驗的本領，但却需要有了解一个生理学实驗、批判一个实驗和建議别人去进行一个实驗的本領．生理学家不需要有証明某一个数学定理的本領，但是必須能够了解数学定理中的生理学意义，能够告訴数学家他应当去寻找什么东西．我們多年来梦想着集合这样一批自由的科学家，在这样一块科学处女地上共同工作．他們結合在一起，并不象一羣下属围繞着一个司令官，而是由于那种要想理解这整个区域和互相取长补短的愿望，更正确地說，由于这样一种精神上的需要．

远在我們选定共同研究的領域和各自分担的部分之前，我們在这些問題上的观点就已經一致了．走上这新的一步的决定性因素是战爭．很久以来，我就知道，一旦国家有事，我的作用将主要地决定于两件事情：同万湼瓦·布希博士所拟訂的計算机研究計划进行密切接触，我同李郁荣博士关于电网絡設計工作的合作．事实上，这两件事情后来都証明了是重要的．1940年夏天，我把大部分注意力轉向发展計算机来解答偏微分方程．我对于这个問題早就有兴趣，并且相信，和布希博士用他的微分分析机处理得很好的常微分方程的情形不同，这里的主要問題是多变数函数的表示問題．同时我还相信，电視中所用的扫描过程給出了这个問題的答案，而且，事实上电視不止是一种独立的工业，它作为一种新的技术而加以引用就注定了要对工程技术发揮更大的用处．

显然，同常微分方程問題相比，任何扫描过程都必須大大增加所要处理数据的数目．为了要在合理的时間以內得出合理的計算結果，必須使基本运算过程的速度达到极大，并且要避免用那些本性緩慢的步驟来打断这些过程的連續进行．同时还必須使单个过

程的精确度很高，以免由于基本运算过程的大量重复使得积累起来的誤差大到断送了全部精确性的地步．因此我提出了下列建議：

1）在計算机中心部分，加法和乘法装置应当是数字式的，如同通常的加法机一样，而不是基于量度的，如同布希微分分析机那样；

2）这些实质上是开关装置的机件应当由电子管来做，而不要由齿輪或机械替續器来做，以便保証更快速的动作；

3）根据貝尔电話研究所的現有装置所采用的方針，加法和乘法采用二进位制比起采用十进位制来，在装置上大概会更为經济些；

4）全部运算序列要在机器上自动进行，从把数据放进机器的时候起到最后把結果拿出来为止，中間应該沒有人的干預；为此所需的一切邏輯判断都必須由机器自身作出；

5）机器中要包含一种用来儲藏数据的装置，这个装置要迅速地把数据記录下来，并且把数据牢固地保存住，直到清除掉为止，讀出数据要迅速，清除数据也要迅速，而且又要能够立刻用来儲藏新的材料．

这些建議，連同关于如何实現这些建議的初步意見都送交布希博士，以备在战爭中可能有用处．在战爭准备阶段，这些建議似乎不配获得立刻进行研究的那种优先待遇．虽然如此，它們还是代表了那些体現在現代快速計算机中的观念．这些概念在当时思潮的精神之中都已經有了，我絲毫沒有想到要宣布諸如我个人对于引进这些概念的貢献之类的事情．尽管如此，我的这些想法被証明是有用的，我的希望也就是要使我这个备忘录能对工程界普及这些概念发生若干作用，无論如何，我們将要在本书的正文中看到，这都是一些与研究神經系統有关的有趣的观念．

这件工作就这样摆到桌子上来了，虽然这些想法是有用的，却沒有引导罗森勃吕特博士和我来立卽着手加以研究．我們的实际合作是由于另一个計划引起来的，这个計划也是为了上次战爭的

目的而采取的.在战争初期,德国的空軍优势和英国的防御地位使許多科学家的注意力轉向改进防空武器的工作. 甚至在战争以前就已經十分清楚，飞机的高速度使得所有古老的火力瞄准方法都变得陈旧无用了，必須使控制装置能够进行全部必需的計算. 飞机和从前遇到过的所有的射击目标不一样，它的速度比用来击落它的炮弹的速度小不了很多,这个情况带来了很大困难. 因此,十分重要的是,射出炮弹时,并不是要朝着射击目标，而是要使投射物和射击目标在未來的某个时刻同时到达空間的某处. 因此，我們必須寻找到某种預測飞机的未来位置的方法.

最簡单的方法就是把飞机当时的航綫沿着一条直綫外推. 有許多理由推荐这个方法. 飞机在飞行中急轉和拐弯越多，它的有效速度就越小,它用来完成飞行任务的时間就越少,它留在危险区域的时間就越长. 如果其它的条件都相等，飞机就要尽可能地沿直綫飞行. 可是从第一声高射炮打响以后起,条件不相等了,飞行員就可能飞曲綫,翻觔斗,或者用其他方式采取逃避的动作.

如果这种动作飞行員能够完全随意进行，而且飞行員能很聪明地运用他的机会,如同一个优秀的扑克专家那样,那末，他就有足够多的机会在炮弹到达以前来掩飾他所希望到达的位置，使我們不能很准确地計算到射中它的机会，除非我們运用耗費很大的密集防御炮火. 可是情况不是这样，飞行員并沒有按照自己的意愿来操縱飞机的完全自由. 只說一件事情：他是在一架高速飞行着的飞机之中，任何过于急驟地偏离原来航綫的动作都会产生极大的加速度,以致使他失去知觉或使飞机解体.再有他只能用轉动飞机的操縱面的方法来操縱飞机，而轉变到新的飞行状态需要一段短的时間. 即使操縱面轉到新位置,仅仅能改变飞机的加速度，而这种加速度的改变要产生最后效果还必須先轉为速度的改变，然后再轉为位置的改变. 此外，一个飞行員在紧张的战斗状态下很难进行任何十分复杂和自如的随意活动，一般总是习惯于按照他所熟練的活动式样动作.

所有这些都使得飞行的曲綫預測問題的研究值得进行，不管

这个研究的結果会証明实际使用一种带有这种曲綫預測的控制装置是有利的还是不利的．預測一条曲綫的未来就是对曲綫的过去进行某种运算．真正的預測算符不能用任何可以制造的装置来实現．但是却有某些算符能对它作一定的模拟，而且可以用我們所能制造的装置加以实現．我向麻省理工学院的薩美尔·卡德威尔教授建議，認为这些算符是值得試驗一番的，他立即建議我們用布希的微分分析机来試驗，把它当作我們所需要的火力控制装置的現成模型．我們这样作了，其結果将在这本书的正文里討論到．无論如何，結果我发現自己已經参加到一个战爭的研究題目中来，在这个研究計划里，朱林·別格罗和我合伙，研究着預測理論和实現这个理論的装置的結构問題．

可以看出，我已經是第二次从事研究一种用来代替人类特殊功能的机械电学系統的工作了——第一次是实現复杂的計算，第二次是預測未来．在預測未来的研究中，我們不应該迴避討論怎样来执行某些人类功能的問題．在某些火力控制装置中，的确，开始进行瞄准的第一个脉冲是直接由雷达发出的，但是，更为通常的情况是，在火力控制系統中有一个高射炮瞄准手或一个高射炮調度手，或者两个人配合起来，他們作为这个控制系統的一个重要部分而动作．了解他們的特性以便从数学上把他們同他們所操纵的机器結合起来，是很重要的．此外，他們的射击目标，即飞机，也是由人来操纵的，我們正是希望知道它的动作特征．

別格罗先生和我得出了这样的結論：随意活动[1] 中的一个极端重要的因素就是控制工程师們所謂的反饋作用．我将用专門的几章来相当詳尽地討論这个問題．在这里只需說一下，当我們希望按照一个給定的式样来运动的时候，給定的式样和实际完成的运动之間的差异，被用作新的輸入来調节这个运动，使之更接近于給定的式样．举一个例，船舶上有一类操舵机，它将駕駛盘的轉动，作用到一个与舵柄連結的装置上，通过这个装置調节操舵机的一

1）随意活动：生理学上常使用的名詞，指經过大脑皮层反射的、有意識的活动．——汉譯者註．

些气門，使得舵柄朝着把这些气門关閉的方向轉动. 舵柄这样轉动后，就使气門調节装置的另一端回到正中的位置，这样駕駛盘的角位置就再現为舵柄的角位置. 显然，任何妨碍舵柄运动的摩擦力或其他阻碍力，都会增加进入某一边气門的蒸气量，而減少进入另一边气門的蒸气量，这样就增加了使得舵柄到达所要求的位置上去的轉矩. 这样，这个反饋系統就使得操舵机的动作相对地独立于其荷載.

另一方面，在有时間延滯等等的条件下，一个过于粗魯的反饋会使船舵越位，并且跟着还会有一个来自另一方向的反饋，使船舵越位得更厉害，直到駕駛机构发生強烈的摆动或振动 (hunting) 以至完全毀坏为止. 在麦考尔所写的那类书[1]里，我們可以找到，关于反饋起有利作用和起破坏作用的非常詳尽的討論. 反饋現象是一种我們已經从量的方面非常透彻地了解了的現象.

現在，假定我撿起一枝鉛笔. 为了去撿，我必須运动某些肌肉. 除了少数解剖学专家外，我們大家都不知道这是哪些肌肉；而且即使在解剖学家中間，也未必有人能够有意識地用連續地收縮每一条有关的肌肉的办法来实現这一动作. 相反地，我們只是要**去撿起鉛笔**. 我們一旦决定了这一点，我們的动作就朝着这样的方向进行，粗略地說，就是使表示鉛笔尚未被撿起的量逐漸減少. 这一部分运动并不完全是有意識的.

要按这样的方式来完成一个动作，必須将有关每一瞬时我們尚未撿起鉛笔的量的报告送到神經系統，不論是有意識的或无意識的. 如果我們用眼睛看着鉛笔，这个报告可能就是視覚的，至少部分是視覚的，但是这种报告更一般地是运动感覚的，或者用流行的术語說，是本体感受的. 如果我們失去了本体感受的感覚，而又沒有用視覚或者其他的感覚来替代，那么我們就不能够完成撿起鉛笔的动作，从而发現自己处在所謂**运动失調**的状态. 这种类型的运动失調在叫做脊髓痨(或称运动性共济失調病)的中枢神經系統梅毒病中，是十分常見的；在这种病中，由脊髓神經来传达的运

1) McColl, L. A., *Fundamental Theory of Servomechanisms*, Van Nostrand, New York, 1946.

动感觉或多或少受到損坏.

然而,一个过度的反饋妨碍有組織的活动的严重程度,似乎和一个不足的反饋所造成的一样. 別格罗先生和我估計到这种可能性,向罗森勃呂特博士提出了一种特殊的問題. 有沒有任何一种病理条件,在这种病理条件下,病人在試图去实現象撿鉛笔那样的随意动作时,超过了目的物,然后发生了一种不能控制的摆动? 罗森勃呂特博士立即回答我們說,确有这样一种大家熟知的情况,它叫做目的震顫,常常因小脑受伤而引起.

这样, 我們就找到了一个极端重要的論据来支持我們关于至少是某一些随意活动的性質的假說. 应当指出, 我們的观点比神經生理学家們中間流行的观点高明得多. 中枢神經系統不再是从感觉接受輸入又把它发射給肌肉的一个独立自足的器官.相反地,它的某些最具有特征性的活动, 只有把它当作一个从神經系統出发进入肌肉,然后通过感官(不論是本体感受器官或者是特殊感觉器官)再进入神經系統的环形过程, 才能理解. 这在我們看来,是标志着神經生理学研究中的一个新的阶段, 这一部分神經生理学不仅涉及神經和突触的基本过程, 而且涉及神經系統作为一个整体的活动.

我們三个人觉得这个新观点值得写成一篇論文, 我們就写出来并且发表了[1]. 罗森勃呂特博士和我預見到这篇論文只能够是一个宏大的实驗工作計划的开头,我們想,如果我們的建立一个介乎各門科学之間的科学部門的計划得以实現, 这个題目就会成为我們研究活动的几乎是理想的中心.

根据通訊工程的知識水平,別格罗先生和我已經清楚地知道,控制工程的問題和通訊工程的問題是不能区分开来的,而且,这些問題的关鍵并不是环繞着电工技术, 而是环繞着更为基本的消息概念,不論这消息是由电的、机械的或是神經的方式传递的. 消息是分布在时間上的可量事件的离散的或連續的序列——确切地

1) Rosenblueth, Wiener & Bigelow, "Behaviour, Purpose & Teleology", *Philosophy of Science*, Vol. 10, pp. 18-24 (1943).

說，就是統計学家的所謂时間序列．預测一个消息的未来，就是用某种算符去运算这个消息的过去，不管这个算符是由一个数学計算的公式实現的，还是由一个机械装置或电的装置实現的．在这方面，我們发現，我們最初設想的理想的預测机构，遇到了由两类具有对抗性質的誤差所引起的困难．我們最初設計的預测装置能够用来預测一个特别光滑的曲綫到任何所要求的近似程度，可是，这种精細程度常常是靠提高仪器的灵敏度得来的．这种装置对于光滑波越是适用，它越是容易被离开光滑性的微小偏差引起振盪，而等待这种振盪消失所要的时間也就越长．因此，光滑波的良好預测，看来比对粗糙曲綫的最优可能預测，要求更精密更灵敏的装置，而每一特殊場合下所用的特定装置的选择，取决于要加以預测的現象的統計性質．这一对相互影响的誤差，与海森堡量子力学中的，用海森堡的测不准原理来描述的测量位置与测量动量的矛盾問題，有某些共同之点．

我們一旦清楚地了解到，最优預测問題的解决仅仅取决于要加以預测的时間序列的統計性質，那就不难把在預测理論中原来認为是困难的东西变成为实际解决預测問題的有效工具．設已知一个时間序列的統計性質，我們就能够推导出用某种技术实現的、具有一定时間超前的預测所产生的均方誤差的显函表示式．有了这个公式，我們就能把最优預测問題变成为决定一个特殊算符的問題，这个特殊算符要把一个依存于它的特殊正量降到极小値．这类极小化問題属于数学中一个現成的分枝，即变分法，这个分枝有一种現成的技术．借助于这种技术，我們能够得到对已知其統計性質的时間序列的未来預测問題的显函最优解，并且还能进一步用一种可以制造的装置从物理上来实現这个解．

我們一旦做到了这一点，就至少給工程設計上的一个問題开辟了全新的局面．一般地說，工程設計与其說是一門科学，不如說是一种艺术．而把这一类問題归結为极小化原理，我們就把这个部門建立在更为科学的基础上．我們发現，这不是一个孤立的事件，而是涉及工程工作的整个領域，在这个領域里，类似的設計問

題可以用变分法來解决.

我們用同样的方法研究和解决了其它类似的問題. 滤波器設計問題便是其中之一. 我們发現, 一个消息常常被我們叫作本底噪声的外来干扰混杂了. 于是我們面临着一个問題, 这就是要用一个算符作用于被混杂了的消息之上, 以恢复成原来的消息, 或是恢复成具有給定超前的消息, 或具有給定滞后的消息. 这个算符的最优設計, 以及用来实現这个算符的装置的最优設計, 取决于消息和噪声的分别的和联合的統計性质. 这样, 我們便在滤波器的設計工作中, 把原来具有經驗性的甚至有些偶然性的过程, 代之以具有透澈的科学判断的过程.

这样一来, 我們就把通訊工程变成为一門統計科学, 变成为統計力学的一个分枝. 一个多世紀以来, 統計力学的观念的确在浸入科学的每一分枝. 我們将看到, 統計力学在現代物理学中的这种优势地位, 对于解释时間的本性具有十分生动的意义. 在通信工程的場合, 統計因素的意义是直接明了的. 信息的传递除非作为二中择一的事件的传递, 否則是不可能的. 如果只有一个偶然事件拿来传递, 那么根本不发消息是最有效而最少麻煩的发送方法. 电报机和电話机只有在它們所传递的消息以不完全决定于其过去的方式連續变化的时候才能发揮它們的功能, 也只有在这些消息的变化符合某种統計規律的时候才能有效地被設計出来.

为了概括通信工程的这个局面, 我們必須发展一个关于信息量的統計理論, 在这个理論中, 单位信息量就是对具有相等概念的二中择一的事物作单一选择时所传递出去的信息. 这个思想差不多在同一个时候由好几位科学家提了出来, 其中有統計学家 R. A. 費希尔, 貝尔电話研究所的申农博士[1]和作者自己. 費希尔研究这个題目的动机来自古典統計理論; 申农的动机来自信息編碼問題; 作者本人的动机則来自电滤波器中的噪声与消息問題. 附带提一

---

1) 見 Shannon, C. E., Weaver, W., "The mathematical theory of communication", The University of Illinois Press, Urbana, 1949.——汉譯者注.

提，我在这方面的某些思想，是从苏联的哥尔莫戈洛夫[1]的早期工作得来的，虽然我的工作的相当大的部分是在我注意到这个苏联学派的工作以前完成的。

信息量的概念非常自然地从属于統計力学的一个古典概念——熵。正如一个系統中的信息量是它的組織化程度的度量，一个系統的熵就是它的无組織程度的度量；这一个正好是那一个的負数。这个观点引导我們产生了許多关于热力学第二定律的考虑，引导我們去研究所謂麦克斯威尔妖的可能性問題。这些問題也从关于酶和其它催化剂的研究中独立地产生出来，而关于酶和催化剂的研究主要是为了专門了解有生命的物質的新陈代謝和生殖之类的基本現象。生命的第三种基本現象——应激性则属于通信論的范围，而归入我們刚才討論过的那一羣观念中[2]。

早在四年以前，围繞着罗森勃呂特博士和我的一羣科学家就已經訊識到有关通信、控制和統計力学的一系列核心問題之間的本質上的統一，不管这些問題是机器中的还是活的机体中的。另一方面，关于这些問題的文献缺乏統一，沒有任何共同术語，甚至沒有一个称呼这个領域的簡单名称等等情况严重地妨碍着我們。經过仔細考虑，我們得到这样的結論：所有現有的术語不是过分偏于这一方面就是过分偏于那一方面，不能符合于这个領域的未来发展；正如科学家們常常碰到的那样，我們被迫至少去創造一个新的希腊术語来填补这个缺口。我們决定把这个关于既是机器中又是动物中的控制和通信理論的整个領域叫作 *Cybernetics*（控制論），这个字我們是从希腊字 κυβερνήτης 或"掌舵人"变来的。在选择这个字时，我們是想用它来紀念关于反饋机构的第一篇重要論文，这是麦克斯威尔在 1868 年[3]发表的一篇关于調速器的文章。

---

1) Колмогоров А. Н., "Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей", Изв. АН СССР, сер. Мат., т. 5, стр. 3—14, 1941.

2) Schrödinger, Erwin, "What is life?" Cambridge U. Press. Cambridge, Eng., 1945.

3) Maxwell, J. C., *Proc. Roy. Soc.* (London), 16, 270—283 (1868).

而拉丁字調速器(governor)一字是从 κυβερνήτηζ 訛誤引伸而来的. 我們也想提到这个事实：船舶的操舵机的确是反饋机构的一种最早而且最发达的形式[1].

虽然控制論这个名詞的产生不早于 1947 年夏天，我們觉得用它来叙述这个領域发展的較早时期仍然是恰当的。大約在 1942 年前后，这个学科分别在几条战綫上发展. 开头，别格罗、罗森勃呂特和維納合写的論文中的思想由罗森勃呂特博士在 1942 年在紐約召开的一次会議上加以传播，这个会議是梅氏基金会主办，专門討論神經系統中枢抑制問題的. 参加会議的人中有伊利諾大学医学院的瓦·麦克卡洛博士，他早已同罗森勃呂特博士和我有过接触，他对大脑皮质組織的研究很有兴趣.

在控制論的历史上反复出現过的一个因素，即数理邏輯的影响，这时也参与进来了. 假如我必須为控制論从科学史上挑选一位守护神，那就挑选萊布尼茨. 萊布尼茨的哲学集中表現在两个密切联系着的概念上——普遍符号論的概念和推理演算的概念. 今日的数学記号和符号邏輯即来源于此. 正如算术的演算經历了一个由算盘和桌上計算机到今日的快速計算机的机械化过程，萊布尼茨的推理演算器里就包含着推理机器即理解机的萌芽. 誠然，萊布尼茨自己和他的前輩巴斯葛一样，兴趣在于制造計算机. 因此，絲毫不必惊訝，推动了数理邏輯发展的同一种智力冲动，同时也推动了思惟过程的理想的或实际的机械化.

一个能够办得到的数学証明，是一个可以用有限数目的符号写出的証明. 这些符号，事实上，可能会与无限的概念有关，但是，这种关系是我們可以由有限个步驟加起来得到的；如象数学归納

1) "控制論" (κυβερνήτικη) 一詞并不是新詞. 它在柏拉图的著作中是常見的. 在那里它的本义通常是駕船术，操舵术，但是不止一次变义地用于表示管理人的艺术. (見 Guilbaud G. T., "La cybernétique", Press Universitaires de France, Paris, 1954, pp. 6—7). 1834 年，著名法国物理学家安培同样在研究科学分类問題的时候，援古例把管理国家的科学叫控制論. 在这个意义下控制論一詞編入十九世紀許多著名詞典中. 安培把控制論与 "этнодицеей" (民权的科学)，外交术和"政权論"一起都列为政治科学，而且控制論与政权論构成了他的政治一詞的本义.——俄譯者注.

法的情形，在那里我們証明一个依賴于参数 n 的定理当 $n=0$ 时正确，又証明 $n+1$ 的情况可以从 n 的情况中推导出来，于是就証明了对于 n 的所有正值，定理都是正确的．而且我們的推演过程的运算規則必須在数目上是有限的，即使它們因与无限的概念有关而表面上看来不是有限的，但是当这无限概念本身可以用有限項表示出来时，推演过程的运算規則仍然是有限的．簡言之，对于象希尔伯特那样的唯名論者和象威衣尔那样的直覚主义者都同样十分明白：数理邏輯理論的发展要遭遇到限制着計算机工作的同样性質的障碍．以后我們将看到，用这个观点甚至能够来解释康脫和罗素的詩論．

我自己以前是罗素的学生，受了他很大的影响．申农博士在麻省理工学院做的博士論文是关于类的古典布尔代数方法在电工开关系統研究中的应用[1]．图灵也許是第一个把机器的邏輯可能性作为一种智力实驗来研究的人，他在战爭时期作为一个电子学家給英国政府服务，現在是德丁頓国立物理研究室的发展新型計算机計划的負責人．

从数理邏輯的領域跑到控制論方面来的另一个年輕的移民是匹茨．他曾經是卡尔納普在芝加哥的学生，也曾和拉舍甫斯基教授及其生物物理学学派接触过．順便提一提，这个学派在吸引有数学头脑的人注意生物科学的問題方面，很有貢献，虽然在我們某些人看来，他們过于強調能和势的問題，过于相信古典物理学的方法，以为这样就能够在研究象神經系統这样的系統时做出尽可能的最好的工作，而这样的系統远不是能够仅仅从能量上加以說明的．

匹茨先生很幸运受到了麦克卡洛的影响，他們倆很早就开始研究关于由突触把神經纖維联合为渾成一体的系統的問題．他們和申农沒有联系，独立地运用了数理邏輯的方法来討論那些归根

---

1) 类的布尔代数——邏輯演算法，因紀念十九世紀英国数学家和邏輯学家布尔·热尔德薩而取此名．所提到的申农的研究在 *Trans. AIEE*, Vol. 57, 1938, p. 713 和 *Bell System Tech J.* 1949, Vol. 28, No. 1, p. 59 的論文中有說明．——俄譯者注．

结蒂是开关问题的问题. 他们增添了一些在申农的早期工作中作用并不显著的因素，虽然他们一定受到了图灵思想的启发，即：用时间作为一个参数，考虑到含有环形的网络，考虑到突触的延迟和其它延迟[1].

1943年夏天我遇见了波士顿市立医院的莱特文博士. 他对有关神经机制的问题很感兴趣. 他是匹茨先生[2]的密友，他曾使我了解了匹茨的工作. 他邀请匹茨先生到波士顿来，并把他介绍给罗森勃吕特博士和我. 我们欢迎他参加我们的集体. 匹茨先生于1943年秋来到麻省理工学院，目的是为了同我一道工作，也为了打好他在研究控制论这门新科学中的数学基础. 这门科学那时已经确然诞生，但还没有受洗礼.

这时，匹茨先生已经充分熟悉了数理逻辑和神经生理学，但不曾有过很多接触工程的机会. 特别是，他还不熟悉申农博士的工作，在电子学方面还没有多少经验. 当我拿一些现代的真空管给他看，并且给他说明这些真空管正是用来实现他的神经元线路与系统模型的理想方法时，他感到极大的兴趣. 从那时起，我们已经清楚地认识到，以替续的开关装置为基础的快速计算机必定会是神经系统中发生的各种问题的几乎合乎理想的模型. 神经元兴奋的全或无的性质，完全类似于二进位制中决定数字时的单一选择，这种二进位制我们不只一个人设想过，认为它是计算机设计的最合适的基础. 突触无非是这样一种机构，它决定来自别的一些选定元件的输出的特定组合是否将成为足以使下一个元件产生兴奋的刺激，而且这种决定的精确性要类似计算机. 解释动物记忆的性质和变化的问题，与机器中的人工记忆的问题也是互相类似的.

这时，计算机的制造已经证明对于战争有很重要的作用，为布希博士始料所不及，制造工作也在好几个中心沿着与我早先的报

1) Turing, A. M., "On Computable Number, with an Application to Entscheidungsproblem", *Proceedings of the London Mathematical Society*, Ser. 2, 42, 230—265 (1936).

2) McCulloch, W. S. and Pitts, W., "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *Bull. Math. Biophys.*, 5, 115—133 (1943).

告所指出的相差无几的路綫在进展．哈佛、亚伯丁試射場和宾夕法尼亚大学已經在制造机器，普林斯頓高級研究所和麻省理工学院不久也进入同一个領域．在这个过程中，有一个从机械結构到电結构，从十进位到二进位，从机械替續器到継电器，从由人指导运算到自动指导运算的逐渐的进步；总之，每一个新的机器都比以前的机器更加証明了我送給布希博士的备忘录的正确性．在这方面有兴趣的人們經常来往．我們得到了和同事們交流思想的机会，特別是同哈佛大学的艾肯博士，高級研究所的馮・諾意曼博士，宾夕法尼亚大学研究 ENIAC[1] 和 EDVAC[2]計算机的戈德斯汀博士．只要我們碰在一起，我們就互相細心傾听，不久工程师們的辞彙中就滲进了神經生理学家和生理学家的专門名詞．

到了进程的这个阶段，馮・諾意曼博士和我都感到需要召开一次所有对于我們現在叫作控制論的这門科学感到兴趣的人全都参加的会議，这个会在 1943—1944 年之間的冬末在普林斯頓召开了．工程师們、生理学家們和数学家們全都有代表参加．罗森勃呂特博士沒有可能来参加，因为他刚刚接受了聘請，去領导墨西哥国立心脏学研究所的生理研究室，但是麦克卡洛博士和洛克菲勒研究所的罗浪特博士代表了生理学家．艾肯博士也不能来参加；可是，戈德斯汀博士是到会的几位計算机設計者之一，而馮・諾意曼博士、匹茨先生和我則是数学家．生理学家們从他們的观点对控制論問題提出了集体意見，同样地，計算机設計者們也提出了他們的方法和目标．会議后期，大家都明白到，在不同領域的工作者之間的确存在着一个实在的共同思想基础，每一个集体中的人都可以运用已經由別人发展得更为成熟的概念，必須采取一些步驟

1) ENIAC——Electronic Numerical Integrator and Automatic Calculator，即电子数字积分器和自动計算器．这是美国第一架电子計算机，战爭期間由費拉德尔非亚的宾夕法尼亚大学为美軍軍械局制造的．1946年2月作了第一次公开表演，以后由在梅里林德的亚伯丁試射場弹道实驗室使用．——俄譯者注．

2) EDVAC——Electronic Discrete Variable Automatic Computer，即离散变数的电子自动計算机，这是宾夕法尼亚大学建造的第二架电子計算机；是由梅里林德的亚伯丁試射場弹道实驗室預訂的．——俄譯者注．

来获得共同的辞彙.

在相当久以前，魏維尔領导的战爭研究团体发表了一个文件，这个文件起初是秘密的，后来是半公开的，它包括了別格罗先生和我关于預測器和濾波器的工作[1]. 我們发現对于現有的防空火力的条件，曲綫預測的特殊装置的設計并沒有被証明是优越的，但是其原理却被証明是正确的和实用的，并且被政府用于解决平滑化和与之有关的若干領域的問題. 特別是，从我們所研究的变分法問題归結出来的这类积分方程，也出現在波导問題和其它应用数学方面看来有兴趣的問題之中. 于是，到了战爭結束时預測理論的观念和通訊工程統計处理的观念已經为美国和英国的大部統計学家和通訊工程师所熟悉了. 人們也注意到了那份政府文件（現在已經絕版），以及列文生、华尔曼、丹尼尔、菲力浦斯和其他等人为了塡补这个空白所写[2] 的相当数量的說明性文章. 我自己还有一篇写了几年的数学方面的說明性的长文，把我所完成的工作永久地記載下来. 但是由于一些并不完全由我控制的情況，这篇文章未能迅速出版. 直到最后，美国数学会和数理統計研究所1947年春在紐約召开了一次联席会議专門从一种密切接近控制論的观点来研究随机过程，我才把这个已写成的手稿交給伊利諾艾斯大学的杜蒲教授，換用了他的符号，并根据他的意見列为美国数学会的数学概覽丛书之一[3]. 我已經把我的一部分工作在麻省理工学院数学系1945年夏的一个講座課程上宣讀过. 以后，我从前的学生和同事李郁荣博士[4]从中国回来了. 1947 年秋他在麻省理工学院电工系开了一門关于濾波器及其类似装置的新設計方法的課程，并且計划把这些講授材料整理成一本书. 与此同时，那份絕

---

1) 維納在另一书中提到，这份軍事报告是 1942 年 2 月公布的.——俄譯者注.

2) Levinson, *J. Math. and Physics* (M.I.T.) 1947.

3) 后来編入杜蒲所写的“随机过程”一书中 (Doob J. L., "Stochastic Processes", Wiley-Chapman & Hall, New York-London, 1953. 有俄譯本：Дуб Дж. Л., Вероятностый процессы, М., ИЛ, 1956). 在該书序言中杜蒲指出有关綫性預測的第十二章是在維納的帮助下写成的.——俄譯者注.

4) Lee Y. W. (李郁荣) *J. Math. and Physics* (M.I.T.), 1932.

版的政府文件又重印了[1].

我已經說过，罗森勃吕特博士大約在1944年初回到墨西哥．1945年春，我接到墨西哥数学会要我参加那年6月在瓜达拉哈拉召开的一次会議的邀請．这次邀請是得到科学研究鼓励和协調委員会的贊同的．这个机构的主持人便是我前面提到过的瓦拉尔塔先生．罗森勃吕特博士邀請我去共同进行一些研究工作．国立心脏学研究所及其所长夏伟士博士盛情地款待了我．

我那时在墨西哥逗留了約十个星期．罗森勃吕特博士和我决定継續研究我們曾經和堪农博士討論过的那条研究綫索．堪农有一次在訪問罗森勃吕特的时候，和他談到过这个問題．可惜，那是一次最后的会晤．这件工作牽涉到癲癇的強直性收縮、陣攣性收縮和时相性收縮与心脏的強直性痙攣、搏动和纖維性顫动之間的关系．我們覚得心肌組織是一种应激性組織，它和神經組織一样，是可以用来研究传导机制的，不仅如此，心肌纖維的吻合与交叉較之神經突触問題是一种比較簡单的現象．我們也深深感謝夏伟士博士的无条件厚待；虽然这个研究所从来沒有限制罗森勃吕特博士只能研究心脏的規定，我們还是乐意能有机会来为这个所的主要任务效劳．

我們的研究采取了两个方向：二維或多維均勻传导介质中的传导性与潛藏性現象的研究和传导纖維的混乱不定网絡的传导性质的統計研究．前者引导我們得到心脏扑动的初步理論，后者导致对纖維性顫动的某种可能的理解．我們把这两个方向的工作写成了一篇論文并且发表了[2]，虽然在这两个方面，我們的最初結果还需要再作大量的校正与补充．关于扑动的工作由麻省理工学院的塞尔弗烈兹先生継續做下去，而心肌网絡中所用的統計技术也

1) 維納此处所指的是他的"平稳时間序列的外推，內插和平滑化"一书的結論，"Extrapolation, Interpolation and Smothing of Stationary Time Series", Technology Press of M.I.T.—John Wiley & Son, New York—Chapman & Hall, London, 1949. 在此书的序言中維納提到苏联数学家 A. H. 哥尔莫戈洛夫和 H. A. 科佐廖叶娃的工作.——俄譯者注.

2) Wiener, N., Rosenblueth, A., "Conduction of Impulses in Cardine Muscle", *Arch. Inst. Cardiol Mex.*, 16; 205;265.

被匹茨先生推广到处理神經元网絡的問題，匹茨这时已經是領取古根海姆基金会的奖学金的研究生．实驗工作由罗森勃呂特博士在国立心脏学研究所和墨西哥陆軍医学院的拉莫司博士的协助下継續进行．

在墨西哥数学会的瓜达拉哈拉会議上，罗森勃呂特博士和我报告了我們的一些研究結果．我們已經得到这样的結論：我們早先的合作計划已經証明是实际可行的．我們十分幸运能有机会把我們的結果报告給这样多的听众．1946年春天，麦克卡洛博士与梅氏基金会商定在紐約首次召开一系列专門討論反饋問題的会議．这些会議按照传統的方式召开，是由弗萊蒙·司密斯博士极为有效地加以筹划的，他代表基金会来組織这些会議．会議集合了一个規模适度的(不超过二十人)在各个有关領域中的工作者的集体，他們一連两天在一起，一天到晚就是非正式地宣讀論文、討論、吃飯，毫不停歇，直到他們消除了相互的分歧，并且能够更好地順着同一路綫去思索为止．会議的核心就是1944年在普林斯頓聚会过的那个集体，但是麦克卡洛和弗萊蒙·司密斯博士正确地看到了这个主題在心理学和社会学方面的运用，因此又邀請了一些著名的心理学家，社会学家和人类学家参加到这个集体中来．把心理学家吸收进来的必要性，从一开头便很明显了．研究神經系統的人不能忘記心理，研究心理的人也不能忘記神經系統．过去大多数心理学实际上不过是特殊感覚器官的生理学，控制論引到心理学中去的观念全都是牽涉到与这些特殊感覚器官相联系的高度特殊化的皮質区域的生理学和解剖学的．从一开始起，我們就預料到，对于格式塔[1]的感知的問題，也就是关于完形感知的形成問題，将会被証明是属于这种性質的．我們把一个方形認作方形，不管它的位置、大小和指向，其机制是怎样的呢？芝加哥大学的克呂弗教授，已故的麻省理工学院的萊文博士和紐約的爱立克逊博士这些心理学家帮助了我們来研究这些問題，也把我們的概念对

1) 格式塔 (Gestalt)——完形，所謂“完形心理学”的专門名詞．——俄譯者注．

心理学有些什么用处和帮助告訴了心理学家.

至于說到社会学和人类学,十分明显,信息和通訊作为組織化机制不但对于个体是重要的而且对于集体也是重要的. 对于象螞蚁这样的社会团体,如果对他們的通訊方法沒有透彻的研究,是完全不可能理解的. 我們很幸运, 在这方面得到了希尔达博士的帮助. 关于人类組織的类似問題, 我們从人类学家柏特逊和米德博士那里得到了帮助; 而高級研究所的摩根希呑博士則是我們在属于經济理論的社会組織这个重要領域中的顾問. 顺便說一說, 他和馮·諾意曼合写的关于博奕論的非常重要的著作是用同控制論的主题密切有关但又有区别的方法的观点来研究社会組織的一部非常有趣味的著作[1]. 萊文博士等的新的研究工作是关于輿論分析的理論和关于制造輿論的实践問題, 諾斯洛普博士則对闡明我們的工作的哲学意义感到兴趣.

这还不是我們这个集体的全部名单. 我們还把这个集体扩大到包括更多的工程师和数学家如別格罗和沙威其, 更多的神經解剖学家和神經生理学家如馮·波宁和諾意特. 我們在 1946 年春天召开的第一次会議上所講的內容, 主要包括参加普林斯頓会議的人宣讀的启发性的論文, 以及所有到会的人对于这个領域的重要性的一般評价. 会議感到, 控制論所包含的思想对于与会的人十分重要和有趣,值得以后每隔六个月就継續举行一次;而在举行下一次全体会議之前,应該为那些数学訓練較少的人开一次小会,用尽可能簡明的語言向他們闡明有关的数学概念的性質.

1946年夏天,我回到墨西哥,在洛克菲勒基金会的支持和国立心脏学研究所的款待下, 継續进行罗森勃呂特博士和我的共同工作. 这次我們决定选取一个直接涉及反饋主题的神經問題, 看看我們到底能从实驗方面做些什么. 我們选定猫作实驗动物, 选定股四头肌作为进行研究的肌肉. 我們切断肌附着, 把肌肉固定到

---

1) 指的是馮·諾意曼,摩根希呑的"博奕論和經济行为"一书 (Von Neumann J., Morgenstern O. "Theory of Games and Economic Behaviour", Princeton University Press, 1943 (Ist ed.); 1947 (2nd ed.) ——俄譯者注.

一个已知张力的槓杆上，然后記录其等长或等张收縮．我們又用了一个示波器来記录肌肉自身中同时发生的电变化．我們主要用猫作实験，先在醚麻醉下截除大脑，然后作脊髓的胸部横切．在許多情况下，还使用了馬錢子素以加強反射反应．我們使肌肉載荷到这样的程度，这时，一次輕叩就会使它进入周期性收縮，这在生理学家的語彙中叫作陣攣．我們观察了收縮的式样，注意到了猫的生理条件，肌肉上的載荷，振动的頻率，引起振动的基本能級及其振幅．我們試图象分析一个表現出同一振动式样的力学或电学系統那样来分析上述系統．我們运用了，例如，麦考尔討論伺服系統一书上的方法．这里不是討論我們的結果的充分意义的地方，这些結果我們正在重作并准备写出来发表．无論如何，下面的說法或是已經成立或者是非常可能成立的：陣攣性振动的頻率对于載荷条件的改变，远不如我們所設想的那样灵敏；它几乎完全是由传出神經—肌肉—运动終体—传入神經—中枢突触—传出神經的封閉弧的常数所决定，而不是由其它东西决定的．如果我們把传出神經每秒传送的冲动数作为綫性的底，那么，这个綫路甚至从一級近似来說也不是一个綫性运算器的綫路，但是如果我們用冲动数的对数作底，那么这个綫路就很接近于綫性运算器的綫路了．这与传出神經刺激的包絡綫的形状并不近乎正弦波形，而这个曲綫的对数却相当近乎正弦波形的事实是相符的；而在具有恆定能級的綫性振动系統中，刺激曲綫的形状除了那些几率为零的情况以外，都必須是正弦波形的．此外，兴奋和抑制的概念，在性質上更接近于乘法而不是加法．例如，一个完全的抑制等于乘上零，部分的抑制等于乘上一个小量．兴奋与抑制的概念已經用到討論反射弧上去了[1]．更有意思的是，突触是一个符合記录器，只有在一个很小的总合时間內传入冲动数目超过某一定閾时传出纖維才能被激发．如果这个閾和传入冲动[2]的总数比較起来足够低的話，那

1）墨西哥国立心脏学研究所的关于陣攣的未发表的論文．

2）原文为传入突触(incoming synapse)，俄譯本改为传入信号（входных сигналов），看来原文可能有誤，为与前句連接改譯为“传入冲动”．——汉譯者注．

么突触机构就起乘上一个几率的作用，因而它只有在一个对数系統里才可能近似地成为一綫性的元件．突触机构的这种近似的对数性質肯定是与魏勃-費希納的感覺強度定理的近似对数性質有联系的，虽然这个定理仅仅是第一級的近似．

最重要之点在于，以对数为底．根据从单个冲动通过神經肌肉弧的各个元件的传导中得到的数据，我們就能够用伺服工程中求一稳定状态被破坏的反饋系統的搜索振动的频率的方法，得出关于陣攣振动的实际周期的很好的近似結果．我們得到每秒約13.9次的理論振动值，而观察到的振动频率，变化于7到30之間，不过一般的变化是保持在12到17之間的范围內．在此情况下，这种符合是很不錯的．

陣攣的频率并不是我們可以观察的唯一重要现象：基础张力还有相对緩慢的变化，而振幅也有更为緩慢的变化．这些现象肯定地决不是綫性的．虽然如此，如果綫性振动系統的常数变化得足够緩慢，那末，作为第一級近似，就可以假定常数的变化是无限地緩慢的，而这样在系統振动的每一段时間內，都可以把系統的运动看作是参数不变的綫性振动系統的运动．这就是在物理学其它分枝中叫作久期微扰的方法．这个方法可以用来研究陣攣的基本能級和振幅的問題．这件工作现在虽然还沒有完成，但已經清楚地看出，这个方法既是可能的也是有希望的．还有这样一个强烈的启发：虽然在陣攣时主弧也同步地在动作，因而証明主弧是一个二神經元的弧，这个弧上冲动的增強在一点也許在更多点上仍然是可变的．还有，这种增強的某部分可以为緩慢的多神經元过程所影响，这些过程发生在中枢神經系統中，而中枢神經系統較之对陣攣作首先的同步反应的脊髓連鎖說来，是处在更高的地位．这种可变的增強可以受中枢一般程度的活动的影响，受馬錢子素或麻醉剂的使用的影响，受去除大脑以及其它許多原因的影响．

罗森勃呂特和我把这些主要研究成果带到了1946年秋梅氏基金会主办的会議上以及同时由紐約科学院召开的为了向更多的人宣传控制論观念的一次会議上去．虽然我們为自己的成果感到

高兴，并且深信顺着这个方向进行的工作一般是可以实行的，可是我們仍然感到共同工作的时間过于短促，感到我們的工作是在急于发表的过大的压力下完成的，沒有作进一步的实驗証实．1947年的夏天和秋天，我們着手寻求这样的証实——它自然可能近乎一种反駁．

洛克菲勒基金会早已应允罗森勃呂特博士給他在国立心脏研究所装备一座新的实驗室．我們感到現在时机已經成熟，应該联名向負責物理科学部的魏維尔博士和負責医学科学部的莫利森博士請求为我們建立长时間科学合作的基础，以便用更加从容和良好的步伐来实現我們的計划．我們各人的工作机关对这件事都給予了热情的支持．在談判时麻省理工学院理科部主任哈利逊博士是理工学院方面的首席代表，夏伟士博士則代表国立心脏学研究所．在談判中确定，联合活动的实驗中心应当在心脏学研究所．这是为了避免实驗設备的重复，也是为了照顾洛克菲勒基金会在拉丁美洲建立科学中心的強烈愿望．最后定下的計划为期五年，这五年中我每隔一年应当到心脏所去六个月，而罗森勃呂特博士則应在另外的那些年里到理工学院来六个月．在心脏所的六个月用来获得和解释有关控制論的实驗数据，而其余年份則用来作更带理論性的研究，特别是給愿意进入这个新的領域的人制訂一个訓練大綱，这是一个非常困难的問題，因为这个訓練大綱，一方面要使他們能够获得必要的关于数学、物理学和工程学的基础，另一方面又要获得生物学、心理学和医学技术的专門知識．

1947年春麦克卡洛博士和匹茨先生做了一件在控制論方面有很大意义的工作．麦克卡洛博士接受了設計一种帮助盲人用耳代目閱讀印刷品的装置的任务．通过光电池的作用来产生各种音调，这类方法是早已有历史的了，这可以用无数方法来实現；困难之点在于要使得只要給出文字的式样，不管文字的大小多么不同，声音的式样却要是一样的．这与形状的知覚，格式塔的知覚的問題十分类似，形状的知覚使人把方形認作方形，不管方形的大小和所朝的方向有多大变化．麦克卡洛博士的机器包括一个对不同大

小的印刷字体的选择誦讀器．这种选择誦讀可以作为一个扫描过程来自动实現．这种扫描能够把一个形象和另一个大小与它不同的标准形象作比較，这就是我在梅氏基金会召开的一次会議上提到过的一种装置．这个选择誦讀器的装置图引起了馮·波宁博士的注意，他立刻問道：“这是不是一张大脑視覚皮質第四层的图？”受到这个启发后，麦克卡洛博士在匹茨先生的帮助下創造了一个把視覚皮質的解剖学和生理学联系起来的学說．在这个学說中，經过一組变換的扫描的动作，起了重要的作用．这个成果在1947年春天梅氏基金会召开的会議和紐約科学院的会議上报告了．最后，这个扫描过程有一个特定的周期时間，它相当于普通电視中的所謂“扫描时間”．关于根据运轉一周所必需的相連突触的长度来判断这个周期时間，存在有各种解剖学上的解釋．这些解釋得出了动作一周所需的完全运轉的时間，其数量級約为十分之一秒，而这接近于大脑的所謂“α律”的周期．最后，根据其它証据，我們已經推测到α律視覚产生的根源，在形状知覚过程中很为重要．

1947年春天，我接到邀請要我参加在法国南錫举行的討論調和分析問題的数学会議．我接受了邀請．往返途中，我在英国停留了总共三个星期的时間，主要是作为我的老友海登教授的客人．我得到了一个极好的机会去会晤許多研究快速計算机的人，特别是在曼彻斯特和在德丁頓国立物理研究室工作的人，更重要的是和德丁頓的图灵討論了控制論的基本思想．我也拜訪了劍桥的心理研究室，得到了一个很好的机会来討論巴特拉脫教授及其同事們正在进行的关于牽連到人的控制过程中，人的因素的研究工作．我发覚，对于控制論的兴趣，在英国和在美国一样，也是很大而且很有素养的，他們在工程方面的工作做得很出色，虽然不免受到經費較少的限制．我发現人們对于控制論在各个方面的可能性有着很大兴趣和了解，海登、勒維和貝尔納教授認为它是科学和科学的哲学的日程上最紧急的問題．可是在統一目标和把各种研究綫索联成一气方面，我却沒有看到很多的进展，不象我們在美国做到的

那样.

法国南錫的关于調和分析的会議包括了許多篇把統計观念和从通訊工程中来的观念联系起来的論文，联系的方式与控制論的观点完全一致. 这里我必須特别提出勃兰·拉皮尔和劳埃維的名字. 我也看到了数学家、生理学家和物理化学家对于这門学科的浓厚兴趣，特别是关于其热力学的方面，因为这些方面涉及生命自身性質的更一般的問題. 在我动身以前，我曾經在波士頓和一位匈牙利生物化学家生特·乔治教授討論过这个問題，并且发現他的观念和我一致.

我在法国逗留期間，有一个黄昏特别值得在这里提一提，我的麻省理工学院的同事山特兰納教授把我介紹給赫曼书店的弗里曼，他要求出版我这本书. 我特别高兴接受他的約請，因为弗里曼是一个墨西哥人，而这本书的写作以及促成写这本书的大部分研究，都是在墨西哥进行的.

我已經提到，梅氏基金会主办的会議上提出的許多观念隐隐指出了一个工作方向，即是关于社会系統中的通訊概念和通訊技术的重要性. 毫无疑問，社会系統是一个象个体那样的組織，它是由一个通訊系統联結在一起的，它也有它的动力学，其中具有反饋性質的循环过程起着重要的作用. 在人类学和社会学的一般領域中是如此，在更专門的經济学領域中也是如此；我提到过的馮·諾意曼和摩根希吞关于博奕論的十分重要的工作，便进入了这个思想領域. 在这个基础上，貝德逊和米德两位博士考虑到現在这个混乱时代里社会和經济問題的急迫性，曾經慫恿我用大部分精力去討論控制論的这一个側面.

虽然我十分同情他們对于目前局勢的迫切性的看法，虽然我十分希望他們和其他有資格的人士来研究这类我将在这本书最末一章討論到的問題[1]，但我仍然既不能同意他們认为我应該首先注

1) 維納在"人应該象人那样来使用，控制論与社会"一书中也談到这个問題. (Wiener N., "The Human Use of Human Beings, Cybernetics and Society", Eyre and Spottiswood, London, 1st ed. 1950; 2nd ed., 1954. 有俄譯本: Винер Н., "Кибернетика и общество". М., ИЛ. 1958). ——俄譯者注.

意这个領域的看法，也不能同意他們認为在这方面能够获得相当进展从而对目前的社会病症能够产生多少治疗效果的看法．首先，这是因为影响社会的主要的量并不都是統計的量，就是那些統計的量，它們所凭借的統計游程也过于短暂．把柏塞麦炼鋼法使用以前和以后的鋼鉄工业的經济学总括在一起是沒有多大用处的，把产生汽車工业和馬来亚人工种植三叶胶以前和以后的橡胶生产的統計加以比較也是如此．把发明六〇六以前和以后两个时期的性病事件統計在一张表里，也沒有任何重要用处，除非用来研究这种药物的效力．要得到一个有用的社会統計，就需要处于基本上稳定的条件下的长久的統計游程，正如精密的光学鑑别需要有大孔径的透鏡一样．透鏡的有效孔径并不因其名义上的孔径的增大而相应地增大，除非透鏡是由非常均匀的材料作成，能使光在透鏡不同部分中的延迟与原来設計的理論值不符合的程度比一个波长的一小部分还要小．同样，在变化很多的条件下的长久統計游程的益处是有名无实的．因此，人文科学并不是这种新数学技术的很好的試驗場所：正如我們将气体統計力学用来研究一个分子大小的事物那样不好，因为我們从大处着眼而加以忽略的涨落，这时却成为最重要的事情了．而且，在缺乏可靠的标准的計算技术的情况下，对于各种社会学、人类学和經济学的量的估計，行家的判断因素是如此重要，以至一个还沒有大量經驗尚未成为行家的新手簡直毫无用武之地．順便我还要提到，小样品理論的現代工具，一旦越出了只由它自身的特定参数的所决定的范围，而变成为一个新情况下的眞正的統計推論时，就不能使我对它有任何信賴，除非它是由这样一个統計学家来运用，他能够清楚地了解到情况的动力学上的主要因素，或者隐約地感到它．

我上面講到了这样一个領域，在这个領域里，由于了解到我們希望得到的数据不能充分得到，所以我們对控制論的期望肯定地受到了抑制．另外还有两个領域，我极其希望能够借助于控制論的概念获得某些实际的成果，但这个希望的实现还有待于将来的发展．其中之一是断掉的或癱瘓了的肢体的修复术．我們在討論

格式塔时已經看到，通訊工程的观念已被麦克卡洛用来研究失去的感觉的替代問題，即制造一种能够帮助盲人用听觉来讀书的工具的問題．在这里，麦克卡洛建議的工具不仅能十分明显地代替眼睛的某些功能，而且还能代替視觉皮质的某些功能．在人造肢体方面，也有着获得某些类似成果的明显的可能性．一段肢体的丧失，不仅意味着失去这段肢体对身体的純粹被动的支持，或者說，失去它作为殘肢的机械延伸的价值，以及失去了这段肢体上的肌肉的收縮力，而且也意味着失去了来自这段肢体的皮肤感觉和运动感觉．前两种損失正是現在人造肢体制造者所企图弥补的，后一种損失則远在他們考虑的范围之外．如果是簡单的假足，这些感觉并不重要：代替失去肢体的那根棍子本身不能作任何自由动作，殘体的运动机构完全足以报告它自己的位置和速度．但病人靠殘留的筋肉作用举起一只带有活动膝头和踝骨的假肢向前走时，情况就不同了．他得不到关于肢体位置和运动的足够的报告，这就影响了他在不規則地面上行走时步伐的准确性．看来，給人造脚的骨关节和脚底装上应力計或压力計并沒有任何不可克服的困难，这种仪表可用电的方法或其他方法，例如用振动器，把結果記录在完好的皮肤上．現在的人造肢体消除了由截除而来的某些癱瘓，但由运动失調而来的癱瘓則未能消除．如果使用了专門的感受器，則这种运动失調的大部分将同样消失，病人将能学会我們大家在开車时使用的那些反射，他也能用更为准确的步伐行走．我們談的关于下肢的一切，对于上肢也都能适用，甚至更为适用．神經学书籍讀者們全都熟悉的人体模型表明，单独截除姆指所引起的感觉丧失，甚至比截除体关节所引起的感觉丧失要大得多．

我已經設法把这些考虑报告給有关当局，但迄今为止在这方面我还不能获得很多成果．我不知道是不是这些想法已从别的来源提出过，或者人們已經試驗过这种想法并发現在技术上是不能实現．如果人們还沒有得到一个眞正实际可行的結果，他們在不久的将来就会得到的．

現在我們来討論我相信值得注意的另一点．很久以来我就明

白，现代超速计算机在原理上是自动控制装置的理想的中枢神经系统；并且它的输入和输出不是必需采取数字和图样的形式，也可以分别利用象光电池和温度计这样的人造感觉器官的读数，以及马达或螺线管的运动情况．利用应力计或类似的仪器读出这些运动器官的运动情况，并把它当作人造的运动感觉去报告，去“反馈”给中枢控制系统，这样我们就能够制造出具有几乎是任何精巧程度的性能的人工机器了．在长崎事件和社会公众知道原子弹以前很久，我就认识到我们已面临着一个在为善和作恶两方面都有空前重要性的社会力量．自动工厂、无人管理的装配线已经在望，它的实现只是决定于我们是否愿意使用如同在第二次世界大战中发展雷达技术时所花费过的那样大的力量[1]．

我已经说过，这个新的发展对于为善与作恶，都有无穷的可能性．例如，只说一件事，它使得巴特勒[2]所幻想的机器的暗中统治成为最直接、最明显的问题．它给人类以许多新的极为有效的机器奴隶来进行人类的劳动．这种机器劳动最具有奴隶劳动的经济性质，虽然与奴隶劳动不同，它并不包含直接的人身虐待的恶劣后果．可是，任何劳动，只要接受了与奴隶劳动竞争的条件，也就是接受了奴隶劳动的条件，它在本质上就是奴隶劳动．这句话的关键字眼是竞争．由于使用机器而免除了繁重的不愉快的工作的需要，这也许是一件好事，也许不是，我不知道．我们不能用市场上的术语，根据所节约的金钱便断定这些新的潜力是好的；这完全是所谓“第五自由”的公开市场的术语，它已经成为由美国制造商协会和星期六晚邮报所代表的那部分美国舆论的国籍鉴别语．我说美国舆论，因为作为一个美国人，我最了解它，但是商人是不承认国界的．

也许我可以澄清一下目前局势的历史背景．如果我说，第一

---

1) Fortune, 32, 139—147 (October); 163—169 (November, 1945).

2) 十九世纪英国作家，“爱理翁”(Erewhon)和重游爱理翁”(Erewhon Revisited)两书的作者巴特勒曾提及此，在他的书中描写一虚构的爱理翁国家，因为机器害多于利而废除了机器．见 Мортон А. Л., “英国的乌托邦”(“Английская Утопия”. М. ИЛ. 1956, гл. V, §3).——俄译者注．

次工业革命是革"阴暗的魔鬼的磨房"[1]的命，是人手由于和机器竞争而貶值；如果使用鏟和鎬的美国掘土工同一台也可以算作掘土工的汽鏟竞爭，他的工資将低至无可再低，以致不能活下去；那末現在的工业革命便在于人脑的貶值，至少人脑所起的較簡单的較具有常規性質的判断作用将要貶值．当然，正如第一次工业革命在某种程度上留下了熟練的木匠，熟練的机器匠，熟練的成衣匠一样，第二次工业革命也会留下熟練科学家和熟練的行政人員．然而假如第二次工业革命已經完成，具有中等学术能力水平或更差一些的人将会沒有任何值得別人花錢来买的可以出卖的东西了．

答案自然是要求建立一个以人的价值为基础而不是以买卖为基础的社会．要达到这个社会，我們还需要大量的筹謀和奋斗．如果万事如意，那自然合乎理想，否則，誰知道呢？因此，我感到有責任把我对于这个局势的知識和理解告訴积极关心劳动的条件和前途的那些人——即告訴劳工联合会．

我曾經和产业組織协会的一两个高級人士接触过，他們非常明智而关注地傾听了我的意見．但是无論是我或者他們中的任何个人都不能进一步有所作为．根据他們的意見（这意見和我先前在美国和英国观察和了解的相同）：劳工联合会和劳工运动掌握在一羣有很大局限性的人們手中，他們在行会小組活动和工資与工作条件爭論的专門問題方面有极好的訓練，但完全无能参与更大的政治、技术、社会和經济的問題，而这些問題正是牽涉到劳工本身的存在的．造成这种情况的理由很容易看出来：劳工联合会的干部一般都是从紧张的工人生活走到紧张的行政人員生活，沒有任何机会获得更广泛的訓練；而对于有过这种訓練的人，工会生涯一般又不是很有引誘力的；而且很自然，这样的人，工会也不是乐意接受的．

我們这些对于控制論这个新的科学有所貢献的人，因此都处

1）此句出自英国艺术家和詩人布列依卡的詩，布列依卡是十九世紀初工业革命时的人，他在自己的烏托邦著作中指責工业革命的各种缺点（見 Мортон А. Л. "英国的烏托邦" гл. V § 1）．——俄譯者注．

在一个道义的位置上，这个位置，至少是不很安适的．我們促进了一个新的科学的发軔，这門新科学，我已經說过，包含着这样的技术发展，它具有为善和作恶的巨大可能性．我們只能把它交給我們在其中生存的这个世界，而这就是德国貝尔森集中营和广島的世界．我們甚至无法制止这些新技术的发展．它們属于这个时代．我們中間任何人所能做的最高限度，是制止把这方面的发展交到那些最不負責任和最唯利是图的工程师的手中去．我們最多只能指望广大公众了解目前这項工作的趋势与方向，把我們个人的努力限制在諸如生理学和心理学这样的远离战爭和剝削的領域里．我們已經看到，有这样的一些人，他們希望，从控制論得到的对人和社会的更深刻的理解的这一好处，将能预料并胜过控制論对权力集中方面所起的偶然的作用(权力，由于其存在条件本身，常常集中在最魯莽的人的手中)．我是在 1947 年写这些話的，我不得不說，这是一个非常微小的希望．

作者在这里表示他对匹茨先生、塞尔弗烈茲先生、杜伯先生和韦伯斯特先生的感謝，感謝他們替我校正手稿和准备付印的材料．

于国立心脏学研究所

墨西哥 Ciudad 1947 年 11 月

第 一 章

牛頓时間和柏格森时間

有一首德国儿童都很熟悉的短歌，歌詞如下：

"Weisst wie viele Sterne stehen
In dem blauen Himmelszelt?
Weisst, wie viele Wolken gehen
Weit hinüber alle Welt?
Gott der Herr hat sie gezählet
Dass ihm auch nicht eines fehlet
Von der ganzen grossen Zahl".

这首短歌的意思是："你知道有多少星星位在蓝色的天空？你知道有多少云朵飘浮过大地？上帝对它們作过清点，数字虽然巨大，可是一无遗漏."

这首短歌对于哲学家和科学史家是一个有趣的論題．歌詞里幷举了天文和气象两門科学：它們的共同点，就是同样都以我們头上的天空作为研究的对象；但除此以外，它們在任何方面都是极其不同的．天文学是最古老的科学，而气象学却是那些刚刚够格的最年青的科学之一．多少世紀以来，人們就能够預測比較常見的天文現象；但是，要精确地預測明天的天气，一般是不容易的，許多地方的确做得非常粗糙．

回头来看这首短歌．对于歌中提出的第一个問題，答案是：在一定条件下，我們就能够知道星体的数目．这首先因为，除了若干双星和变星稍微具有不确定性外，每顆星都是一个确定的对象，极其便于計算和編目．如果人制的星表 (Durchmusterung)——我們

这样地来称呼星的目录——沒有把某一等級以下的星体包括在星表里的話，那末，在神的灵智中收录的星星一定要多得多，这样的观念对我們說来并不算是太荒誕的.

但是，如果你請气象学家給你一个类似的云表，那他会当面笑話你，或者向你耐心解释說：在气象学的全部語彙中，根本找不到似乎永远就是那样一朵的那种云朵；即便有的話，他既沒有办法計算，也沒有計算的兴趣. 一个有拓扑学偏好的气象学家，也許会把一朵云定义为空間的某种連通区域，在这个区域中，处在固态或液态的水，其容量密度超过了一定值. 然而，这个定义对任何人都沒有用处，它至多描写了一个极端短暫的状态. 气象学家眞正关心的是这样一类的統計資料："波士頓，1950年1月17日，云量38%，卷积云".

誠然，天文学中有一个被称做宇宙气象学的分支，像詹都拉什卡尔（Chandrasekhar）所研究的是銀河系、星云、星团和它們的統計規律；但是这个分支在天文学中非常年青，比气象学自身还要年青，而且是某种不合乎古典天文学传統的东西. 古典天文学，按照传統，除了純粹分类和編制星表这些工作外，着重研究太阳系，而不是恆星世界. 它是太阳系的天文学，它主要是同哥白尼、开卜勒、伽里略、牛頓等人的名字联在一起的. 近代物理学是由它哺养长大的.

这实在是一門合乎理想的单純的科学. 在任何一种动力学理論出現以前，甚至远溯到巴比倫时代，人們就已經知道，在过去和未来若干年代中日蝕都是在可預測的周期中出現的. 人們还发現，根据星体的运动可以比任何其它方法更好地测定时間. 太阳系中发生的一切事件的模型，都象是一个輪子或几个輪子在轉动，这不論是在托勒密的本輪說中，或是哥白尼的軌道說中都是如此，而且在这些学說的任何一种中，未来总是以某种形式重复着过去. 天体的音乐是一种巴林覚密（palindrome）[1]，天文曆书順讀和倒讀

---

1) palindrome（希腊字），指詞和句子当把它們从后往前讀时，仍保持原义，如"комок""рор тор".——俄譯者注.

都是一样的．除了初始位置和方向外，順轉和逆轉的两个太阳仪之間的运动沒有任何差別．最后，当这一切被牛頓归結为一組抽象的公設并推演出一門严格的力学的时候，这种力学的基本定律不因时間变数 t 变为它的負数而改变．

因此，假如把一部行星运动的电影片的放映速度加快，使得我們可以感覚到行星的运动，同时倒轉过来放映，那末它还是符合于牛頓力学的一种可能的行星运动状态．但是，假如把一部关于雷暴云中云乱流的电影片倒轉过来放映，那末一切都不对头了．应当看到上昇气流的地方却看到了下降气流，云气不是在結集而是在疏散，閃电反而出現在云朵发生变化之先，以及无数其他奇怪現象．

天文学和气象学所以这样不同，特別是天文学时間显然是可逆的，而气象学时間显然是不可逆的，其原因在那里呢？首先，气象学系統是由数目极多而大小几乎相等的質点构成的，其中有些質点彼此有非常紧密耦合的相互关系；而以太阳系为中心的天文系統則情况相反，它只包括数目比較少而大小又极为悬殊的一些質点，这些質点彼此間的联系十分松弛，以致第二次的耦合效应不会影响我們观測的基本情况，而更高次的耦合效应則可以全部略去．行星是在少数几种力支配的条件下运动的，这种孤立的程度比之实驗室中进行的任何物理实驗还要彻底得多．和行星之間的距离相比較，行星乃至太阳差不多就是質点．从它們的弹性形变与塑性形变来看，行星差不多就是刚体，即使不是这样，无論如何，当我們考察它們中心的相对运动的时候，它們的內力是比較不重要的．在行星运动的空間中，几乎完全沒有什么阻碍物；在研究行星相互吸引的时候，可以认为它們的質量差不多集中在中心上而且是不变的．万有引力定律和平方反比定律之間的分歧非常之小．我們对太阳系中各个星体的位置、速度和質量在任何时候都是十分清楚的；如果要計算它們的未来和过去的位置，細节上虽然有困难，但原則上是容易的，計算的結果也是正确的．然而，在气象学方面，我們涉及的質点，数目这么多，要准确記录它們的初始

位置和初始速度是絕对不可能的;即使眞的做出这种記录，也算出宅們未来的位置和速度，我們得到的无非是一堆乱七八糟的数字，要想使宅有任何用处，还得从根本上重新加以解释．所謂“云”、“温度”、“乱流”等等术語都不是指的个别的物理狀态，而是指的許多可能狀态(虽則成为現实的只是其中的一个狀态)的分布．如果我們同时記下全世界气象站的全部測量結果，按照牛頓观点去看，宅們还是不能提供說明大气实际狀況所必需的数据的亿万分之一．宅們只能提供和千变万化的大气运动狀态相一致的某些常数．頂多再提供一些先驗的假定，这些假定能够对一系列可能的大气狀态提出宅們的几率分布，也就是提出宅們的測度．运用牛頓定律或任何其宅因果体系，我們对未来任何时刻所能做的預測只是系統中若干常数的几率分布，甚至这种可預測性还会随着时間的增长而消失．

即使在时間完全可逆的牛頓系統中，当回答几率和預測問題的时候也要发生过去和未来之間不对称的情況，因为这类問題本身就是不对称的．假如我来安排一个物理实驗，使得我所考察的物理系統从过去阶段进入現在阶段，我把某些量固定下来，我有理由去假定另一些量具有已知的統計分布，然后我来观測一定时間后各項結果的統計分布．这不是一个能够逆轉过来进行的过程．如果要使宅能够逆轉过来进行，那就必須选出系統的一个适当分布，使系統不受我們的干涉自已就会进入某种統計限界內，同时还必須找到为实現这个分布，在一定时間以前的先决条件．但是，从未知的位置出发而会进入任何严格規定的統計范圍中去的系統，就象奇蹟一样难找，我們的实驗技术当然不能建立在等待和計算奇蹟的基础上面．总之，我們是受时間支配的，我們跟未来的关系和我們跟过去的关系并不相同．我們的一切問題都被这种不对称性制約着，我們对这些問題的全部答案也同样受着这种約束．

在談到天体物理学时間的时候，发生了一个非常有趣的关于时間方向性的天文学問題．在天体物理学中，我們是以一次观測来观察远距离天体的;这种实驗按其性質来說似乎不是单向性的．

那末根据地球上实驗观測而建立起来的单向的热力学为什么会在天体物理学的研究上对我們有那么大的用处呢？答案是有趣的，但是不太簡单．我們观測星体是借助于被观測对象发射出来的并被我們知觉到的光、射綫或质点的作用．我們的眼睛能够知覚射进来的光，但不能知覚射出去的光，或者說，至少我們不能用一种象知覚射进来的光那样簡单而直接的实驗来知覚射出去的光．在知覚射进来的光的时候，我們用眼睛或底片来接受．我們接受影象的条件是使眼睛和底片在前一段时候处于隔离状态：我們先使眼睛处于黑暗中，是为了消除正在过去的影象的痕迹；我們要把底片用黑紙包起来，是为了防止漏光．很清楚，只有这样的眼睛和底片对我們才有用处．假如老是只看到已經过去了的影象，那末我們就等于瞎子；假如在使用底片以后才把它用黑紙包起来，在使用之前就把它拿去冲洗，那就沒法摄影了．正因为这样，我們才能看到那些向着我們和全宇宙放射光芒的星体；但如果还有一些星体是往相反方向进化的話，它們也会从整个天空吸引輻射，这种吸引，即使吸引的是我們地球的輻射，我們也是无法覚察的，因为我們知道的只是我們的过去，不是我們的未来．因此，我們看得到的这一部分宇宙，就輻射的发射而言，它的过去-未来关系一定和我們的过去-未来关系相一致．我們看到一顆星这件事实就是意味着这顆星的热力学和我們的热力学相似．

的确，幻想一个理智动物，其时間方向和我們相反，是一个非常有趣的智力实驗．这个动物和我們之間的一切通訊都是不可能的．他发出的任何訊号到达我們这里的时候，邏輯的順序改变了：在他看来是結果的部分，在我們看来却是原因．这些原因应該都在我們的經驗中出現过，我們很自然地就用它来解释他的訊号，并不去設想这是由一个有理智的动物发来的．如果他給我們画一个正方形，我們一定会把他的最后几笔看成是最前的几笔，而且他所画的正方形，在我們看来，就好象是这些笔跡的奇怪的結晶（这总是可以解释清楚的）．这个图形的意义是那么出人意外，就象我們把一个人的面孔看作高山悬崖了．这种正方形的画法对我們說来

成了一种突然的变动，由于这种突然的变动[1]，正方形不存在了．这的确很突然，但用自然定律还是可以作出解释的．我們的对方对我們也会有完全类似的想法．**能够和我們通訊的任何世界，其时間方向和我們相同．**

再来比較一下牛頓天文学和气象学的不同之点：有很多科学处在中間地位,但比較起来,大多数更象气象学．甚至天文学自身，如上所述，也有宇宙气象学这一分支．天文学还包括了乔治·达尔文爵士所研究的极其重要的領域，叫作潮汐进化論．我們曾經說过,太阳和行星的相对运动可以看作刚体的运动,但是实际情况不完全这样．譬如說，地球几乎是被海洋包围着的．比地球中心近于月球的那一部分水要比那一部分陆地更为強烈地受到月球的吸引，而在另一半球则情况相反．这一比較微小的效应使水形成两个波峯,一个正对月球,一个背对月球．如果地球完全是个液体的球,这两个波峯就会随着月球围繞地球旋轉，能量逸散不大，因此它們的位置可以相当精确地保持着正对月球和背对月球．这样,它們就会对月球形成一个拉力,这对月球在天体中的角位置不会起太大的影响．但是,这两个波峯在地球上产生的潮汐要被海岸和白令海与爱尔兰海这一类浅海拉扯住，因而它落后于月球的位置,而产生潮汐的力则是許多杂乱的和逐漸消失的力,它們的性質和气象学上遇到的力非常相似,需要統計地处理．的确,海洋学可以叫作水圈的气象学,这总比叫作大气的气象学好些．

这些摩擦力阻碍着月球繞地球的运行，同时加速了地球的自轉．这些力量傾向于使一个月的长度和一天的长度彼此接近起来．我們知道,月球的一天就是地球的一月,同时月球总是差不多以同一面朝着地球的．有人猜想这种情况是古代潮汐进化的結

---

1) 由于这种突然的变动，即由于时間方向与我們相反的那个动物在画正方形，正方形反而不見了．这是因为那个动物那里的“过去”(此时正方形还沒有开始画,还是一张白紙)正是我們的“未来”,它的“未来”(此时正方形已經画好)却是我們的过去．因此当那个动物画正方形的时候，从我們的时間顺序看来，先有一张完整的正方形图画,以后却逐步消失了．正象黑板上原有一个用粉笔画好的正方形,我們按画它时相反的笔法顺序,逐步抹去一样．——汉譯者注．

果，那时候，月球含有液体、气体或塑胶体，因而在地球吸引下可以产生潮汐进化，同时在进化的过程中散逸大量的能量．这种潮汐进化的現象不仅限于地球和月球，在一切引力系統中都能观察到一些．在以往年代，潮汐进化現象使太阳系的面貌有过巨大的改变，但在人类的历史阶段中，这种变形和太阳系中行星的"刚体"运动比較起来是微乎其微了．

由此可見，即便在引力天文学中也有逐漸衰減的摩擦过程．沒有一門科学完全符合于严格的牛頓式样．生物学研究的現象完全是单向的．生幷不恰恰是死的反演；同化（即組織的生成）也不恰恰是异化（即組織的破坏）的反演．細胞的分裂不是按照时間上对称的式样来进行的，由种細胞結合变为受精卵的过程也不是这样．个体是順着一个时間方向前进的飞箭，种族也同样是从过去进入未来．

古生物学的記录說明了一种确定不移的長期趋势：进化的过程是从簡单走向复杂，虽然其中有断續，也有交錯．在上一世紀中叶，这种趋势对于一切誠实而心胸开闊的科学家說来，已經十分明显了；达尔文和华萊士两人大約在同时候把解释这种机制的工作都大大地推进了一步，这不是偶然的．这个步驟就是肯定了以下的事实：不論是从个体或是从种族的观点看，由于各种变异都具有不同程度的生活力，种的个体即使仅仅产生一次偶然变异也会或多或少地对該种向一个方向或几个方向进化的路綫发生影响．一只沒有腿的突变种狗一定会餓死；但是，一只瘦长的、已經在肋骨上长出爬行机构的蜥蜴，如果它有光滑的外形同时又沒有妨碍行进的四肢突起的話，那它就会得到更好的生存机会．一个水生动物，无論是魚类、爬虫类或哺乳类，如果是流綫型的、肌肉发达的幷且具有用来打水的尾部构造的話，就会游泳得更好；如果它要依靠迅速的行动来猎捕食物的話，那它必須有上述的形体，才能获得生存机会．

达尔文的进化論是这样一种机制，它把或多或少的偶然变异性联合成一种比較固定的型式．达尔文的原理今天仍然有效，虽

然我們对于这个原理所依据的机制已經有了更多的知識．孟德尔(Mendel)的工作給了我們一个远比达尔文精确的和不連續的遺传观点，而从德·甫里斯(de Vries)以来，突变的概念已經完全改变了我們对于突变的統計基础的概念．我們研究了染色体的細微的解剖构造，并且确定了基因在染色体上的位置．近代遺传学家人数众多而且才能卓絕．其中如海登(Haldane)等人已經使孟德尔遺传学的統計研究成为研究进化論的有效工具．

我們前面談过查理·达尔文的儿子乔治·达尔文爵士的潮汐进化論．父子之間的思想联系以及共同选用"进化"这个术語都不是偶然的．在潮汐进化論中，如同在物种起源学說中一样，可以找到一种机制，按照这种机制，潮汐波和水分子的无規則运动这种偶然变异性通过动力学过程表現为单向的发展型式．十分明显，潮汐进化論就是老达尔文的見解在天文学上的应用．

达尔文的第三代，查理爵士是近代量子力学的权威学者之一．这件事也許是偶然的，但还是說明了統計的观念又进一步侵入了牛頓的观念．麦克士威尔-玻尔兹曼-吉布斯这一串名字說明了热力学正逐漸地被归結为統計力学，也就是說，热和溫度的現象被归結为这样一些現象：对于这些現象我們用牛頓力学去处理的不是单一的动力学系統，而是用許多动力学系統的統計分布；同时我們的結論也不是針对其中个别的系統，而是針对其中的絕大多数．大約在1900年，人們已經知道在热力学中，特别是在輻射問題方面，有若干严重的錯誤．普朗克定律表示：以太吸收高頻輻射的能力比当时存在的任何力学化的輻射理論所允許的要小得多．普朗克用輻射的准原子理論——量子理論——十分令人滿意地解释了这些現象，不过这个理論是和物理学所有其他部分相冲突的．随后玻尔也提出了一个类似于普朗克的 *ad hoc*[1] 原子理論．这样，牛頓和普朗克-玻尔就分别构成了黑格尔二律背反的正命題和反命題．海森堡在1925年发現的統計理論是二者的綜合，在这个理

1）专門适合这种情况的．——俄譯者注．

論中，吉布斯的統計的牛頓动力学被另一个統計理論所代替，这个理論和牛頓与吉布斯說明宏观現象的統計理論很相似；但是，在海森堡的理論中，現在和过去的数据的完全集合还不足以用来比統計更好地預測未来．因此，应該指出：不仅是牛頓天文学，甚至是牛頓物理学也变成了一幅統計状态的平均結果的图画，因而也成了对一种进化过程的說明．

由牛頓的时間可逆到吉布斯的时間不可逆这个轉变是有哲学方面的反响的．柏格森曾經強調指出物理学的时間和进化論与生物学的时間的不同：前者是可逆的，其中沒有什么新事物出現；后者是不可逆的，其中总是发生着新奇的事物．認为牛頓物理学不是生物学的适当框架，这种見解也許就是活力論和机械論古老的論爭中心；虽然这个論爭曾經被一种愿望弄得复杂化了，这个愿望就是想用这种或那种形式，至少把灵魂和上帝的痕跡保留下来，以防御唯物論的侵入．結果是，如我們看到的，活力論者做得太过份了．他們不是在生命的要求和物理学的要求之間建立一堵墻，而是建立了一座把物質和生命一古脑儿都圈进去的万里长城．不錯，新物理学的物質不同于牛頓物理学的物質，但它离活力論者的拟人論的愿望究竟还远得很．量子理論家的所謂偶然不是奥古斯丁道德学上的自由，泰克（Tyche）作为冷酷无情的女神就跟安南克（Ananke）[1]一样．

每个时代的思想都被反映在那个时代的技术中．古代的工程师是土地測量家、天文学家和航海家；十七世紀和十八世紀初期的工程师是鐘表工人和磨透鏡的工人．和古代一样，匠师按照天体的形象去制造工具．一只怀表无非就是一个袖珍太阳仪，它的运动有其必然性，就象天体的运动一样；如果摩擦力和能的逸散在其中起着作用，那么就应該克服这些作用，使时針的运动尽可能地周期化和規律化起来．依照惠更斯和牛頓的方式发展起来的工程学的主要技术成果，就是航海时代的出现，这时人們第一次以相当精

1）泰克（希腊語）——机遇的意思；安南克（希腊語）——命定的意思．

——俄譯者注．

确的方法計算出經度，因而远洋貿易不再是碰运气和冒险的行动，而变成一种正常合理的事业. 这是重商主义者的工程学.

在商人之后出現的是制造商，在計时器之后出現的是蒸气机. 从紐可門蒸气机时代差不多到今天，工程学的中心領域是从事原动机的研究. 热变成了有用的轉动和平动的能量，倫福德、卡諾和焦耳等人补充了牛頓物理学. 热力学随后出現了，这是一門时間显然不可逆的科学；虽然这門科学早期形成的思想体系似乎跟牛頓动力学毫不相干，但是，能量守恆理論和以后对卡諾原理的統計解释、对热力学第二定律或能量逸散原理——这个原理指出蒸气机所能获得的最大效率决定于气缸和冷凝器的工作溫度——所做的統計解释，都使得热力学和牛頓动力学融合为同一門科学的統計的和非統計的两个方面了.

如果十七世紀和十八世紀初叶是鉡表的时代，十八世紀末叶和十九世紀是蒸气机的时代，那么現在就是通訊和控制的时代. 电工学上曾經有过一次分裂，德国人把它叫作強电流技术和弱电流技术之間的分裂，我們知道这就是动力工程学和通訊工程学的划分. 正是这个分裂把过去年代和我們現在生活着的时代区分开来. 誠然，通訊工程学能够处理任何強度的电流，而通訊工程学中机器动作的力量也足够扭轉一个笨重的砲塔；它之所以和动力工程学不同，是因为通訊工程学的主要目的不是在节約能量，而是要使訊号准确地再生. 这个訊号可以是电鍵的叩击，它必須由另一端的电报接受器的叩击再生出来；它也可以是通过电話装置来传递和接收的声音；它也可以是駕駛盘的轉动，結果改变了舵的角位置. 通訊工程学是由高斯(Gauss)、惠士通（Wheatstone）和第一批电报家建立起来的. 在上一世紀中叶第一次横穿大西洋海底的电报工程失敗之后，它才由开尔文爵士給予第一次合理的科学論述；从八十年代以来，在賦予它以現代形态的工作上，大概亥維塞德貢献最多. 在第二次世界大战中，雷达的发明及其应用以及控制防空炮火的迫切任务，把大量有修养的数学家和物理学家都动員到这个領域中来了. 自动計算机的神奇也属于这个思想領域，的确，

人們在过去从来也沒有象今天这样活跃地探究着这个思想領域.

自从得达拉斯(Daedalus)或亚历山大里亚的希罗(Hero of Alexandria)以来,在技术发展的每一阶段上,人們对于技师模仿生命体制造出机器的才能,总是很感觉兴趣的.这种制造和研究自动机的愿望常常用当代技术表現出来.在巫术时代,泥人高兰(Golem)就是一种奇特而邪恶的想法,布拉格的犹太教的法律师用亵瀆上帝圣名的咒語給这个泥象注入了生命.在牛頓时代,自动机就是鐘机音乐箱,頂上装着生硬地跳着足尖舞的小雕象.在十九世紀,自动机就是那著名的热机,燃燒着易燃的燃料以代替人的肌肉中的糖元.最后,現代的自动机用光电管来开門,或者使枪炮向雷达找到飞机的地方瞄准,或者把微分方程的解計算出来.

希腊时代和魔法时代的自动机都不是現代机器的发展方向,它們似乎对重要的哲学思想也从来沒有起过什么作用.鐘机自动机的情况就大不同了.这种思想曾經在現代哲学的初期历史中起过很本質、很重要的作用,虽然我們常常沒有看到这一点.

首先,笛卡尔把低等动物看成是自动机.这样做是要避免对正統的基督教看法表示怀疑,因为正統的基督教看法認为动物沒有可以拯救和懲罰的灵魂.至于这些有生命的自动机究竟怎样活动,据我所知,笛卡尔沒有講过.但是,和这有关的一个重要問題,即人类灵魂(包括感覚和意志这两个方面)与物質环境的关联方式問題,笛卡尔是講过的,虽然他講得极其不能令人滿意.他把这种关联的位置定在他所知道的大脑中央部位——松果体.至于关联的性質——不論它是否表現为心对物和物对心的直接作用——他是不太清楚的.可能他确实把这种关联的性質看作是双方面的直接作用;但是,他把人类經驗作用于外界时的正确性归諸上帝的善良和正直.

归諸上帝的这种作用是不可靠的.假如上帝是完全被动的,那末,很难看出笛卡尔的解释眞正說明了什么东西;假如上帝是主动的参与者,那末,上帝的正直除了保証他是我們感覚活动中的主动参与者外,很难看出还有什么意义.这样,与物質現象的因果关

系平行的还有一条从上帝的活动产生的因果关系，上帝通过这种活动在我們心中創造出同某种物質状况相对应的經驗. 这个假定一旦成立，那就很自然地要把我們的意志与其在外界产生的結果相符合同样归諸神的干涉了. 这是偶因論者格林克斯（Geulincx）和馬勒伯朗士（Malebranche）所追随的道路. 斯宾諾莎在很多方面是这个学派的延續者，偶因論的学說在他那里得到了較为合理的形式：他主张心与物的对应就是上帝的两个独立自足的属性的对应. 但是，斯宾諾莎总是不用动力学的观点来考虑問題的，因之他对这种对应的机制考虑得很少，甚至沒有考虑.

这就是萊布尼茨开始研究以前的局面，但是，萊布尼茨是习惯于用动力学观点去考虑这个問題的，就象斯宾諾莎习惯于用几何学观点去考虑这个問題一样. 首先，他用一双对应的元素的連續統——单子——去代替心和物这一双对应的元素. 这些单子虽然是按照灵魂的式样来設想的，但其中有很多单子沒有达到象完整灵魂那样具有自我意識的程度，它們成为被笛卡尔称作物質的那一部分世界. 每个单子，从創始或負无穷的时間到无限遙远的未来，各以完整的因果关系生存在自己的密閉的宇宙中；它們虽然是密閉的，但由于上帝的預先調和，因而彼此可以对应. 萊布尼茨曾經把单子比作上了发条的能够从开天辟地起永恆地保持同一速度的鐘表. 单子不同于人造的鐘表，它們不会产生快慢的差别，这是造物主的神妙完美的手艺所致.

因此，萊布尼茨是按照鐘机的模式来考察他所构成的自动机世界的，这对于惠更斯的信徒說来是很自然的事. 单子可以互相反映，但这种反映沒有使因果关系互相轉移. 它們实际上就跟八音盒頂上被动地跳着舞的小人那样独立自足，甚至更加独立自足. 它們对外界沒有眞正的影响，而外界也同样地不影响它們. 正如萊布尼茨所說的，它們沒有窗戶. 我們所看到的显然有組織的世界只是某种介乎虛幻和奇蹟之間的东西. 单子乃是牛頓太阳系的縮影.

在十九世紀，人們是从另一种角度来研究人造自动机和那些

自然自动机，即唯物論者所講的动物和植物．能量守恆和能量逸散是当时的基本原理．生命体首先是一部热机，它把葡萄糖、糖元或淀粉，脂肪和蛋白質燃烧为二氧化碳、水和尿素．新陈代謝的平衡問題是人們注意的中心；如果有人注意到动物肌肉的工作温度較低而一架具有同样效率的热机的工作温度較高这个矛盾的話，那也就避而不談，只是用生命体的化学能和热机的热能有所不同的說法来馬馬虎虎地解释一下．所有的基本概念都和能量有关，而主要是和势能有关．身体的工程学是动力工程学的一个分支．这个观点，直到今天，还在那些喜欢用古典看法来考虑問題的保守的生理学家中間占着优势；象拉舍甫斯基（Rashevsky）及其学派这一批生物物理学家的整个思想傾向証明上述見解仍然是有势力的．

今天，我們認为身体远不是一个守恆系統，它的各个組成部分在这样的环境中工作着：它們在这里所能利用的功率远較我們想象的要大得多．电子管就說明一个带有外部能源的系統（全部能量几乎都被浪費掉了）在完成規定的操作上可以是一个极有效的工具，特别是在低能量級下工作的时候．我們已經开始注意到我們躯体中神經系統的原子——神經元——这样重要的要素，它們是在跟眞空管非常相同的条件下工作着，它們所需的很小的功率通过血液循环由外部供給；我們也注意到了記載神經元功能的最本質的簿記不是能量的簿記．总之，对自动机（无論是对金属自动机或是对血肉自动机）的新的研究都是通訊工程学的一个分支，它的基本概念就是关于消息、干扰量或“噪声”（一个从电話工程师那里取得的术語）、信息量、編碼技术等等的概念．

在这种理論中，我們研究着这样一种自动机，它不仅通过能量流动和新陈代謝，而且通过印象和传入消息的流动以及由传出消息引起的动作的流动和外界有效地联系起来．自动机接受印象的器官相当于人和动物的感覚器官．它們包括光电管和其他光接受器，包括用来接收本身发出的短波长波的雷达系統，包括相当于味覚器官的氫离子势記录器，温度計，各种压力計，放大器，等等．

相当于动作器官的可以是电动机、螺綫管、热綫圈或其它不同性質的工具. 在接受器或感官和动作器之間有一系列中介的元件，它們的功用是把传入的印象重新結合起来，以便在动作器中产生所希望的反应. 传入中枢控制系統的信息經常也包含着关于动作器自身工作状况的信息. 发出这些信息的元件和人体的运动感覺器官和其他本体感覺器官相当，因为我們也有記录关节位置或肌肉收縮率等等的器官. 此外，自动机接收到的信息不一定立刻使用，可以被擱置或貯藏起来以供将来之需，这可以跟記忆相似. 最后，在自动机运轉的时候，它的操作規則本身会按照过去通过接受器的数据的情况而多少发生变化，这就象是学习的过程.

我們現在所講的机器不是唯覚論者的梦想，也不是未来某个时候才能实現的希望. 它們已經实現了，恆溫器、自动迴轉罗盘船舶駕駛系統、自动推进导弹——特別是自己寻找目标的导弹、防空炮火的控制系統、自动控制的石油热裂蒸餾器、超速計算机等等都是. 它們在战前很久就开始使用了(实在說，非常古老的蒸气机調速器也应該列在这里头)，但是，第二次世界大战的大規模机械化措施才促使它們具有今天的面貌，为了掌握极端危险的原子能可能也需要把这些机器推向更高的发展阶段. 目前，不到一个月就出一本所謂控制机械或伺服机械的新书，現在的时代眞是伺服机械的时代，就象十九世紀是蒸气机的时代而十八世紀是鐘表的时代一样.

总結一下：現代的各种自动机是通过印象的接受和动作的完成和外界联系起来的. 它們包括感官、动作器和一个用来把从一处到另一处的传递信息加以联結的相当于神經系統的器官. 它們很便于用生理学的术語来描述. 因此，用一种理論把它們跟生理学的机制概括在一起并不是什么奇蹟.

这些机制和时間的关系需要很細心的研究. 当然，輸入-輸出关系在时間上是一种循序关系，而且具有确定的过去-未来的次序，这些都是清楚的. 不够清楚的地方也許就在于灵敏自动机的理論是一个統計的理論. 通訊工程的机器，根据单独一次輸入而

产生的动作是不会使人感到兴趣的．这种机器如果要能充分发揮作用，它就必須对全部輸入都作出令人满意的动作．这也就是說，对一类从統計上預期要收到的輸入做出統計上令人满意的动作．它的理論应該屬于吉布斯統計力学的范围，而不应当屬于古典牛頓力学的范围．这个問題我們将在专門討論信息理論的一章中作詳細的研究．

因此，近代自动机跟生命体一样，都存在于柏格森的时間中．按照柏格森的观点，我們沒有什么理由認为生命体活动的基本方式一定和模拟生命体的人造自动机有所不同．活力論者已經胜利到这样的地步，即使是机械也要符合于活力論的时間結构；但是，如上所述，这个胜利其实是彻底的失败，因为按照任何跟道德、宗教略微有关的观点来看，新的力学跟旧的力学一样地机械．是否应該把这种新观点叫作唯物論观点，这主要是一个講法的問題．十九世紀物理学所处形势的特征就是物質这个概念远比今天更有势力；"唯物論"这个名詞已經差不多变成"机械論"的不严格的同义語了．事实上，机械論者和活力論者全部爭論的問題都因提法不当而被抛到垃圾箱里去了．

第　二　章

羣和統計力学

大約在这个世紀初，有两位科学家，一位在美国，一位在法国，要是說他們稍微有一点知道对方的存在，他們的研究方向表面上却是彼此完全无关的．住在紐哈文（New Haven）的吉布斯（W. Gibbs）发展了他在統計力学方面的新观点．住在巴黎的勒貝格（H. Lebesgue）由于发現了一个用来研究三角級数的新的更有效的积分理論，而和他的老师波瑞耳（E. Borel）齐名．这两位发現者，就他們都是理論工作者而不是实驗工作者这点說，是相象的；但除此以外，他們对科学的整个态度，却完全相反．

吉布斯虽然是数学家，但总認为数学是为物理学服务的．勒貝格則完全是个典型的分析学家，对于数学严密性的极其严格的現代标准，他是一个有才能的代表者；他又是一位著作家，据我所知，他的著作中甚至連一个直接有关物理学問題或方法方面的例子也沒有．然而，他們两人的著作形成了一个整体，其中，吉布斯提出的問題沒有在他自己的著作中找到答案，而是在勒貝格的著作中找到答案的．

吉布斯的基本思想是：按照牛頓动力学的本来面目，我們处理的是一个具有已知初始速度和初始动量的单个系統，这系統在一定的力系作用下，按照把力和加速度联系起来的牛頓定律而变化．但对于絕大多数場合，我們无法知道所有的初始速度和初始动量．可是，如果假定系統的这些沒有完全知道的位置和动量具有一定的初始分布，那末，我們就可以完全用牛頓的方法来决定系統在以后任一时刻的动量和位置的分布．这样，我們就能就这些分布作

出推論，这些推論中有一些具有这样的判断的性質：系統在将来出現某些特征的几率为 1，或出現其他某些特征的几率为零.

几率为 1 和几率为零这两个概念的含义，是完全确定和完全不可能，但它們还有更多的意义．假如我用具有点的尺度的枪弹射击一个靶，我命中靶上任一特定点的机会一般說是零，虽然命中它并不是不可能；的确，当我每次射击的时候，我一定会命中某一特定点，而这本来是一个几率为零的事件．因此，我总会命中某一点这个几率为 1 的事件，可以是由許多几率为零的事件集合构成的.

但是，在吉布斯的統計力学方法中，采用了如下一种手續，不过这个手續是隐含采用的，吉布斯本人从来沒有清楚地意識到；这就是把一个复杂的偶然事件分解成一个由許多比較局部的偶然事件构成的无限序列——第一个、第二个、第三个、等等，它們各有一个已知的几率；而且，这些构成无限序列的比較局部的偶然事件的几率之和，就表示这較大的偶然事件的几率．因此，我們虽然不能在所有可能設想的場合都用几率求和来得到总事件的几率——因为任意个零之和仍为零，但如果总事件中各个偶然事件能够按照第一、第二、第三等等排列起来构成一个序列，其中每一項都有一确定的能用一正整数标示的位置，我們就能够对全部几率求和.

要区别这两种情形，必須对事件集合的性質作相当精細的考虑，吉布斯虽然是个很有权威的数学家，但还不够細緻．能不能有一种无限集，它和其他的无限集，例如正整数集，在浓度[1]上有着本質的差別呢？这个問題在上一世紀末由康脫解决了，答案是："有的"．如果考虑 0 到 1 之間所有不同的分数，无論是有理数或无理数，我們就会看出，它們是不能按照一、二、三……的次序排列起来的——虽然很奇怪的是，所有的有理分数能够这样来排列．因此，

1) 这个"浓度"的原語是 multiplicity，在集合論的术語上，使用势 (power) 这个字．两个集合之間如果有一对一的对应关系，它們便有相同的势．具有与自然数集合相同的势的集合便是可数的势．在这里表現为可以"排列成 1,2,3,…"．
——日譯者注.

吉布斯的統計力学要求对这两种情形加以区别[1]，显然不是不可能的事．勒貝格对吉布斯理論所作的貢献，就在于他証明了，統計力学关于几率为零偶然事件的內在要求，以及关于对这些偶然事件的几率求和的內在要求，实际上是能够实現的；并且他証明了，吉布斯理論本身并不包含任何矛盾．

但是，勒貝格的工作并不是直接基于統計力学的需要，而是基于一个看来完全不同的理論，即三角級数理論的需要．談到三角級数理論，这就要回溯到十八世紀的波和振动的物理学，回溯到当时激烈爭論的一个問題：綫性力学系統的任何运动是否普遍地都能由系統的簡单振动綜合而成；所謂簡单振动，就是指这样的振动，其所經历的时間不过就是它对平衡状态偏离的值乘上一个仅仅与时間有关而与位置无关的或正或負的量．这样，一个函数就表示成一个級数和．級数中各个系数則表示成这函数与一已知的权函数乘积的平均值．整个理論在于，級数的平均值可以用級数中各个項的平均值表示出来．另一方面，我們注意，一个在 0 到 A 的区間中为 1 而在 A 到 1 的区間中为 0 的量，其平均值为 A，可以把它看作已知落在 0 到 1 之間的不定点应当落在 0 到 A 区間中的几率．換句話說，級数平均所需要的理論和为了能充分討論事件的无限序列的复合几率而需要的理論，有着非常密切的关系．这就是为什么勒貝格在解决自己問題的时候也同时解决了吉布斯的問題的原因．

吉布斯討論的特殊分布，本身有其动力学上的解释．假設考虑某个有 N 个自由度的最一般的保守动力学系統，它的位置和速度坐标一共有 $2N$ 个，其中 N 个叫做广义位置坐标，另外 N 个叫做广义动量坐标．这些坐标决定一个 $2N$ 維空間，定义着 $2N$ 維体积．在这空間的任意一个区域中，每个点都依据力学定律随时間而流动，这时，每个点的 $2N$ 个坐标的集合改变为另一个由經过时間

1）几率对于可数事件是可以加的，然而对于不可数的势的事件一般是不能加的（可参照 46 頁的譯注）．在这里势的区别很重要．——日譯者注．

决定的新的 $2N$ 坐标的集合,但是,虽然这个区域的边界在连续变化,它的 $2N$ 维体积并不改变. 因为定义集一般不象定义这些区域那样简单,所以由体积的概念就进一步引出了勒贝格型的测度体系. 对于保守动力学系统,它在经受变换时,勒贝格测度保持不变,此外它还有一个数值可以计算的对变换也保持不变的量,这就是能量. 如果系统中各个物体仅仅是两两相互作用,在空间中任何固定位置和固定方向上没有外部附加力的作用,那末,系统还有另外两个数值保持不变的量. 它们都是矢量,即整个系统的动量和角动量. 我们不难消去相应于它们的坐标,使得系统的自由度更少.

对于很特殊的系统,还可以有一些与能量、动量和角动量无关的其他不变量,它们的数值在系统变化的时候也是不改变的. 然而我们知道,从十分精确的意义上说,实际上很难找到一种力学系统,它既有依赖于系统初始坐标和动量的其他不变量,又能充分正规地用基于勒贝格测度的积分法加以积分[1].对于没有其他不变量的系统,我们可以把相应于能量、动量和总角动量的坐标固定起来,而在其余坐标的空间中,由位置和动量坐标所决定的测度本身又定出一种子测度,正象三维空间的测度能够决定二维曲面族中二维曲面的面积一样. 例如考虑一个同心球面族,当两个固定球面间的总体积规格化为 1 时,两个相邻同心球面间的体积的极限就是球面上面积的测度.

假设我们对能量、总动量和总角动量已定的相空间中的那个区域采用这新的测度,并假定系统此外并无其他可测的不变量. 令这个限定区域的总测度为常数,或者适当改变单位使这常数为 1. 因为我们这个测度是由对时间不变的测度得到的,得到的方法也对时间不变,所以它本身也对时间不变. 我们称它为**相测度**,而对它所取的平均则称为**相平均**.

---

1) Oxtoby, J. C. and Ulam, S.M., "Measure-Preserving Homeomorphisms and Metrical transitivity", *Ann. of Math*, Ser. 2,42, 874—920 (1941).

但是，任何一个随时间变化的量还可以有时间平均．例如，若 $f(t)$ 依赖于 t，那么它对过去的时间平均为

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T}^{0} f(t)\,dt\,; \tag{2.01}$$

对未来的时间平均为

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{0}^{T} f(t)\,dt. \tag{2.02}$$

在吉布斯的统计力学中，时间平均和相平均两者都有．吉布斯企图证明这两种类型的平均在一定意义上是相同的，这是很高明的想法．就吉布斯想到这两种平均是有关的这个观念说，他完全是正确的；但就他企图用来证明这种关系的方法说，他就整个地毫无挽救地错了．这并不能责备他，因为在他逝世的时候，勒贝格积分的名声才刚刚传入美国．过了十五年，它又变成博物馆里的珍品了，唯一的用处只是向年轻的数学家们说明严密性的必要和可能．而且，象奥斯哥德（W. F. Osgood）这样著名的数学家，甚至到他死的时候也没有关心到它[1]．一直到 1930 年初，柯普曼(Koopman)、冯・诺意曼(von Neumann)、贝克荷夫（Birkhoff）这一群数学家，才最后建立起了吉布斯统计力学的真正基础[2]．我们下面在研究各态历经理论(ergodic theory)时将看到这些基础是什么．

吉布斯本人曾经想到，对于一个所有的不变量都被作为多余坐标而消去的系统，相空间中所有各点的运动路径几乎都通过这个空间中的全部坐标．他把这个假说叫做各态历经假说，这个名词是由希腊字 ἔργον（工作)和 ὁδός（路径）来的．但问题首先是，正如普朗切锐耳（Plancherel）和其他一些人指出的，这个假说在任何实际场合都不成立．没有一条可微分的路径能够盖满平面上的一块面积，即使这条路径有无限长．吉布斯的追随者们，也许最后还包括吉布斯本人，都隐约看到了这点，因而他们用准各态历

1）虽然如此，奥斯哥德早期的某些工作还是引向勒贝格积分方向的一个重要步骤．

2）Hopf, E., “Ergodentheorie”, *Ergeb. Math.*, 5, No. 2, Springer, Berlin(1937).

經假說来代替这个假說．准各态历經假說只是說，在时間的进程中，系統一般地几乎通过由已知不变量决定的相空間区域上的每一点．証明这个假說并沒有什么邏輯上的困难，只不过用它来得到吉布斯的結論显得十分不够罢了，因为它沒有涉及到系統在每一点近旁所耗费的相对时間．

为了理解各态历經理論的眞实意义，除了需要平均和测度这两个对弄清吉布斯理論的意义最为必要的概念以外（这里平均是指在給定的域上，对一个在被測的集上为 1 而在其他各处为零的函数的平均），我們还需要更詳細地分析一下不变量和变换羣的概念．我們从吉布斯的矢量分析研究中看到，他对这些概念肯定是熟悉的．然而，可以这样說，吉布斯沒有充分估計到它們的哲学价値．和他的同代人亥維塞德一样，吉布斯也是一个物理-数学上的敏感常常超过邏輯上的敏感的科学家，他一般是正确的，但常常不能解释为什么他是正确的，也不能解释他如何能正确．

任何一門科学的建立，都必須以非孤立現象的存在为前提．如果世界是由一个沒有理性的上帝統治的，他可以一陣心血来潮地作出一連串的奇蹟，那么，在这个世界里，我們就要狼狽不堪地被迫等待每一个新災难的到来．在阿丽思漫游奇境記里的槌球場上，就是这种世界的描繪，在那里，槌球棒是火烈鳥；槌球是慢条斯理地伸张着和自顧自地爬动着的刺猬；球門是紙牌上的士兵，他們也会自动爬起来随便活动活动；而槌球規則是性情暴躁、捉摸不定的心牌皇后的命令．

游戏中的有效規則或物理学上的有用定律的本質，就是它們都能事先予以陈述，而且可以应用到不止一个場合．一个理想的法則，应当能够反映所討論的系統在其具体环境变化时仍然保持同一的那种性質．在最简单的情形下，这是指对施于系統的变换集保持不变的性質．这样，我們就导致变换、变换羣和不变量的概念．

系統的变换表示一种变化，这时系統的每个元变为另一个元．太阳系在时間 t_1 和时間 t_2 之間发生的变化，是各个行星坐标集合

的变换．当移动坐标原点或旋轉坐标軸发生的行星坐标的类似改变，也是一种变换．当我們根据显微鏡的放大作用，試驗一个試品发生的标度改变，同样是一种变换．

施行变换 A 以后接着施行变换 B，結果得到另外一个变换，它叫做 B 和 A 的乘积或合成 BA．注意，乘积一般与 A 和 B 的次序有关．例如，若 A 是将坐标 x 变为 y，y 变为 $-x$ 而 z 不改变的变换；B 是将 x 变为 z，z 变为 $-x$ 而 y 不改变的变换；則 BA 将使 x 变为 y，y 变为 $-z$，z 变为 $-x$；而 AB 将使 x 变为 z，y 变为 $-x$，z 变 $-y$．如果 AB 和 BA 是相同的变换，我們就說 A 和 B 是可交换的．

有时，变换 A 不仅能使系統的每个元都变为系統的某一个元，而且每个元都是对某个元施行这个变换的結果，不过这种变换性质不是任何变换都具有的．在这情形下，存在一个唯一的变换 A^{-1}，使得 AA^{-1} 和 $A^{-1}A$ 构成两个很特殊的变换，它們叫作恆等变换 I，这种变换使每个元仍变为自身．我們把 A^{-1} 叫做 A 的逆变换．显然，A 也是 A^{-1} 的逆变换，I 是其自身的逆变换，而 AB 的逆变换是 $B^{-1}A^{-1}$．

有这样一类变换集：属于这个集的每个变换都具有逆变换，其逆变换也属于这个集；属于这个集的任何两个变换的合成，自身也属于这个集．这类变换集叫做变换羣．所有沿直綫的、平面上的或三維空間中的平移所构成的变换集，都是变换羣；特别是，有一种特殊的变换羣，叫作阿貝耳羣[1)]，其中任何两个变换都是可交换的．繞一点的旋轉和刚体在空間中的各种运动所构成的变换集，都是非阿貝耳羣．

假定我們用一个变换羣对規定某个量的各个元作变换．如果羣中任何一个变换对所有这些元施行变换后这个量保持不变，我們就叫这个量是一个羣不变量．羣不变量有許多种，其中有两种对我們以后特别重要．

第一种就是所謂的綫性羣不变量．令一阿貝尔羣所变换的各

1) 以十九世紀挪威数学家阿貝耳(Abel)命名．——俄譯者注．

个元用 x 来表示；并令 $f(x)$ 是这些元上定义的复值函数，而且具有适当的連續性或可积性．这时，若 Tx 表示变换 T 对 x 作用后得到的元，且 $f(x)$ 是一絕对值为 1 的函数，便得

$$f(Tx) = \alpha(T)f(x), \tag{2.03}$$

式中 $\alpha(T)$ 是一絕对值为 1 的只依賴于 T 的数，那末，我們就說 $f(x)$ 是羣的一个特征标 (character)．在稍微广义的意义上說，它也是羣不变量．如果 $f(x)$ 和 $g(x)$ 都是羣特征标，則 $f(x)\,g(x)$ 显然同 $[f(x)]^{-1}$ 一样也是羣特征标．如果任意一个定义在羣上的函数 $h(x)$ 能表示成羣特征标的綫性組合，即它能写成

$$h(x) = \Sigma A_k f_k(x), \tag{2.04}$$

式中 $f_k(x)$ 是羣的特征标，$\alpha_k(T)$ 对 $f_k(x)$ 的关系与 (2.03) 式中 $\alpha(T)$ 对 $f(x)$ 的关系相同，那末，

$$h(Tx) = \Sigma A_k \alpha_k(T) f_k(x). \tag{2.05}$$

这就是說，如果 $h(x)$ 能用羣特征标集来展开，則对所有的 T，$h(Tx)$ 都能用这些特征标来展开．

前面已經看到，羣特征标的积和反演构成羣的另外一些特征标；同样可以看到，常数 1 是羣的一个特征标．因此，羣特征标对一特征标的乘法构成羣特征标自身的一个变换羣，我們把它叫作原羣的特征标羣．

如果原羣是无限长直綫上的平移羣，即运算子 T 使 x 变为 $x+T$，則(2.03)式变为

$$f(x+T) = \alpha(T)f(x), \tag{2.06}$$

这个等式在 $f(x) = e^{i\lambda x}$, $\alpha(T) = e^{i\lambda T}$ 时成立．这时特征标是函数 $e^{i\lambda x}$，特征标羣則是 λ 变为 $\lambda + \tau$ 的平移羣，就是說它的构造和原羣相同[1]．但如果原羣是围繞一个圓的轉动，就不会有这种情形．这时，运算子 T 使 x 变为一个在 0 到 2π 間的数，这个数与 $x+T$ 相差 2π 的整数倍，如果要使(2.06)式仍然成立，必須附加条件：

$$\alpha(T+2\pi) = \alpha(T). \tag{2.07}$$

1）即特征标羣与原羣**同构**．——譯者注．

如果仍令 $f(x)=e^{i\lambda x}$,我們就得到

$$e^{i2\pi\lambda}=1, \tag{2.08}$$

这就是說,λ 必須是一整数,正的、負的或零. 这样,特征标羣就相当于整数的平移. 反之,如果原羣表示整数的平移羣,则 (2.06) 式中的 x 和 T 只限于是整数值,而 $e^{i\lambda x}$ 只包括从 0 到 2π 間的与 λ 相差 2π 整数倍的数. 因此,这时的特征标羣实际上是繞圓的轉动羣[1].

在任何一个特征标羣中,对于一个給定的特征标 f,$\alpha(T)$ 的数值分布是这样的:对于羣中任何的元 S,当所有的 $\alpha(T)$ 都乘以 $\alpha(S)$ 时,$\alpha(T)$ 的数值分布仍然不变. 这就是說,如果我們有某个对 $\alpha(T)$ 的数値取平均的合理基底,由于这个平均値不受羣的每个变换乘上羣中某一固定变换而构成的羣变换所影响,要就 $\alpha(T)$ 必須恆为 1[2];要就这个平均在乘上了一个不等于 1 的数仍保持不变,所以必須是零;两者必居其一. 由此我們得到結論:任一特征标与其共軛[3](也是一个特征标)的乘积的平均值是 1,而任一特征标与另一特征标的共軛的乘积的平均値是零. 换句話說,如果 $h(x)$ 能表示成 (2.04) 式,我們就有

$$A_k=\text{average }[h(x)\overline{f_k(x)}]. \tag{2.09}$$

在繞圓的轉动羣的情形下,根据这个結果我們直接有:若

$$f(x)=\Sigma a_n e^{inx}, \tag{2.10}$$

则

$$a_n=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)e^{-inx}dx; \tag{2.11}$$

---

1) 此处乃指特征标羣 $e^{i\lambda x}$ 的羣运算子 τ 使 λ 变为一个在 0 到 2π 間的数,这个数与 $\lambda+\tau$ 相差 2π 的整数倍,又因 x 是整数,$e^{i2\pi x}=1$,故特征标羣实际上是一个繞圓的轉动羣.——汉譯者注.

2) 例如当元素的数目为 n 个的有限羣的时候,$a(T)$ 的平均 M 可以用 $\frac{1}{n}\sum_T a(T)$ 得出,但因为 $M=\frac{1}{n}\sum_T a(T)=\frac{1}{n}\sum_T a(ST)=\frac{1}{n}\sum_T a(S)a(T)=a(S)M$,所以总是 $a(S)=1$ 或者 $M=0$.即便不是有限羣,如果"在某种合理的根据之下"得到平均,結果相同.——日譯者注.

3) 共軛——$a(T)$ 的共軛 $\bar{a}(T)$ 是得出 $a(T)$ 的共軛复数之値的 T 的函数.

——日譯者注.

对于沿无限长直綫平移的情形，我們的結果需要比較強的条件：若在适当条件下有

$$f(x)=\int_{-\infty}^{\infty}a(\lambda)e^{i\lambda x}d\lambda, \tag{2.12}$$

则在一定条件下有

$$a(\lambda)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}f(x)e^{-i\lambda x}dx. \tag{2.13}$$

我們这里只是很粗略地叙述了上面这些結果，并沒有詳細説明它們有效的条件．关于这个理論的詳細討論，讀者可参閱下列的参考书[1]．

除了綫性羣不变量理論，还有度量羣不变量的一般理論．度量羣不变量就是勒貝格的測度系統，它在羣所变換的各个元与羣的运算子交換时不改变．关于这一点，我們应当援引哈尔(Haar)的饒有趣味的羣測度理論[2]．在这个理論中，每一个羣，它的元对于羣的乘法运算是可交換的．因此，这个羣应当有一个不变測度．哈尔曾經証明，大多数的羣都具有可以用羣自身的构造来定义的唯一的不变測度．

变換羣的度量不变量理論的最重要应用，就是它能証明相平均和时間平均的可互替性，而这一点，如上所述，吉布斯的尝試是失敗了的．这种可互替性借以建立的基础，就是各态历經理論．

各态历經定理通常从一个具有下述性质的系綜 E 出发：它的測度可定为 1，并且可以通过一个保測变換 T[3]或通过保測变換羣 T^{λ} 变換为自身，这里，$-\infty<\lambda<\infty$，且

1) Wiener, "The Fourier Integral and Certain of its Applications", Cambridge Univ. Press (1932).

2) Haar, H., "Der Maassbegriff in der Theorie der Kontinuierlichen Gruppen", *Ann. of Math.* (2) 34, pp. 147—169 (1933).

3) 保測变換 (measure-preserving transformation)——由系綜 E 向其本身的变換 T 便是"保測变換"．其所指的是：在 E 里有測度 m 的定义．就是說，有 E 的某部分系綜的族 $\mathfrak{L}$，对于 $\mathfrak{L}\ni A$，其測度 $m(A)\geqq 0$ 是一定的，$m(A)$ 便是具有与面积等同样性质的东西．E 的变換 T 将 E 的部分系綜 A 移到 E 的部分系綜 $T(A)$，但如果是"$\mathfrak{L}\ni A$，那么成为 $T(A)\in\mathfrak{L}$，而且 $m(A)=m(T(A))$"的时候，T 就叫作保測变換(保存測度 M 的变換)．——日譯者注．

$$T^{\lambda}\cdot T^{\mu}=T^{\lambda+\mu}. \tag{2.14}$$

各态历經理論涉及到在 E 的各个元 x 上定义的复值函数 $f(x)$. 在所有的場合,我們都認为 $f(x)$ 对 x 是可测的;如果考虑連續变换羣 $\{T^{\lambda}\}$,我們就認为 $f(T^{\lambda}x)$ 同时对 x 和 λ 是可測的.

在柯普曼和馮·諾意曼的平均各态历經定理中,$f(x)$ 是 L^2 类的函数,即

$$\int_E |f(x)|^2 dx<\infty. \tag{2.15}$$

这时,这个定理說:对 T 或 T^{λ},我們应有

$$f_N(x)=\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N} f(T^n x) \tag{2.16}$$

或

$$f_A(x)=\frac{1}{A}\int_0^A f(T^{\lambda}x)d\lambda. \tag{2.17}$$

在此情形下,当 $N\to\infty$ 或 $A\to\infty$ 时,它們各自平均收斂到极限函数 $f^*(x)$,即

$$\lim_{N\to\infty}\int_E |f^*(x)-f_N(x)|^2 dx=0, \tag{2.18}$$

$$\lim_{A\to\infty}\int_E |f^*(x)-f_A(x)|^2 dx=0. \tag{2.19}$$

在貝克荷夫的"几乎处处"收斂的各态历經定理中,$f(x)$ 是 L 类的函数,即

$$\int_E |f(x)|dx<\infty. \tag{2.20}$$

函数 $f_N(x)$ 和 $f_A(x)$ 的定义和 (2.16) 式及 (2.17) 式中的一样.

这时,这个定理說,除了对测度为 0 的 x 的数值集,极限函数

$$f^*(x)=\lim_{N\to\infty} f_N(x) \tag{2.21}$$

和

$$f^*(x)=\lim_{A\to\infty} f_A(x) \tag{2.22}$$

是存在的.

所謂各态历經变换或度量可迁变换的情形是很有趣的,这时,变换 T 或变换集 T^{λ} 仅仅对测度为 1 或为 0 的 x 点集才保持不变.

在这情形下，使 $f^*(x)$ 能有一定范围数值的一組值几乎恆为 1 或恆为 0（无論对那一个各态历經定理来說）。这种情形只有在 $f^*(x)$ 几乎恆为常数时才可能发生。于是，我們可以假定 $f^*(x)$ 的值几乎恆为

$$\int_0^1 f(x)dx. \tag{2.23}$$

这就是說，在柯普曼的定理中，我們有

$$\underset{N\to\infty}{\text{l.i.m.}}^{1)}\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N} f(T^n x) = \int_0^1 f(x)dx; \tag{2.24}$$

而在貝克荷夫的定理中，除了对測度为 0 或几率为 0 的 x 以外，我們有

$$\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N+1}\sum_{n=0}^{N} f(T^n x) = \int_0^1 f(\xi)d\xi. \tag{2.25}$$

对于連續羣 $\{T^\lambda\}$ 的情形，也有类似的結果。以上就是吉布斯相平均和时間平均的可互替性的充分証明。

对于变换 T 或变换羣 T^λ 非各态历經的情形，馮·諾意曼在很普遍的条件下指出，它們可以分解为各个各态历經的成分。就是說，除了对測度为 0 的 x 集，我們总能把 E 分离成有限个或可列个集 E_n 和一个集类 $E(y)$ 的連續統，使得对各个 E_n 和 $E(y)$ 都存在一个在 T 或 T^λ 作用下保持不变的測度。这样，变换 T 和 T^λ 对 E_n 和 $E(y)$ 就是各态历經的了；如果 $S(y)$ 是 S 和 $E(y)$ 的相交部分，S_n 是 S 和 E_n 的相交部分，那末，

$$\underset{E}{\text{測度}}(S) = \int \underset{E_y}{\text{測度}}(S(y))dy + \sum \underset{E_n}{\text{測度}}(S_n). \tag{2.26}$$

换句話說，整个保測变换理論可以归結为各态历經变换的理論。

由以上所述可以看出，全部各态历經理論都可以运用到比那

---

1) $\underset{N\to\infty}{\text{l.i.m.}}\frac{1}{N+1}\sum_{N=0}^{N} f(T^n x) = \int_0^1 f(x)dx$ 表示 $\underset{N\to\infty}{\text{Lim}}\int_0^1 \left|\frac{1}{N+1}\sum_{N=0}^{N} f(T^n x) - \int_0^1 f(x)dx\right|^2 dx = 0$。(l.i.m. 是平均值的极限 (limit in the mean) 的意思)

——日譯者注。

些与直綫上平移羣同构的变换羣还要普遍的变换羣上去，特別是，它可以运用到 n 維平移羣的情形．三維的情形在物理上是重要的．时間平衡的空間比拟就是空間的均匀性，这个理論象均匀气体、均匀流体或均匀固体的理論一样建立在三維的各态历經理論的应用上．有时，一个三維的非各态历經平移变換羣，好象是不同状态混合起来的平移集；它使得在一給定时刻只存在这个状态或那个状态，而不存在两者的混合状态．

統計力学的重要概念之一，同时也能用在古典热力学中的，就是熵的概念．它首先是用来反映相空間中的一种性質，即表示相空間区域的几率測度的对数．例如，假設在一个瓶中有 n 个粒子，这个瓶被分为A和B两部分；让我們从动力学上来考虑这 n 个粒子系統的情形．如果 m 个粒子在A中，$n-m$ 个粒子在B中，那末相空間中某个区域就特征化了：它具有一定的几率測度．这几率測度的对数就是 m 个粒子在A中，$n-m$ 个粒子在B中这种分布的熵．这个力学系統大部分时間所处的状态将接近最大熵的状态，也就是說，在大部分时間內，約有 m_1 个粒子将在A中，$n-m_1$ 个粒子将在B中，而 m_1 个在A中 $n-m_1$ 个在B中的組合几率最大．这意味着，对于由大量粒子构成的系統和实际上可能識別的状态說，如果系統中粒子状态的分布使系統的熵不为最大，那末我們就观察到系統以后的变化几乎总是使得熵增加．

在关于热机这种普通的热力学問題中，我們处理問題的条件是：在气缸这样大的区域內大致达到了热平衡．我們要研究的是熵的那些状态，它們是在給定温度和体积下熵为最大，或者是那些在我們所采用的某个温度下，对全部体积中的少数区域熵为最大的那些状态．即使我們去更詳細地討論热机，甚至討論象渦輪机这种气体膨胀方式比气缸中的更为复杂的热机，上述条件也沒有什么根本的改变．我們这时仍然可以談到局部的温度，而且近似程度非常的好，虽然只有在平衡状态并用只对平衡状态有意义的方法才能精确地决定温度．但是，在生命物質中，甚至这种大致的均匀性也很难找到．我們用电子显微鏡可以看到蛋白質具有非常

确定和精细的結构. 它的生理現象肯定是同样精細的. 这种精細的程度远远超过通常温度計的"时-空"标度的精細程度,因此, 用普通温度計讀出的有生命組織的温度,只是粗略的平均值,不是眞正的热力学温度. 吉布斯的統計力学可以作为躯体內部变化情形的非常合适的模型; 但普通热机提供的图景就完全不对头. 肌肉动作的热效率几乎沒有什么意义, 它肯定不是意味它表面上所显示的那种意义.

統計力学中有个很重要的观念,这就是麦克士威尔妖(Maxwell demon) 的观念. 假設有一气体,其中的粒子按照給定温度下統計平衡的速度分布而运动. 对于理想气体, 这个分布是麦克士威尔分布. 假定現在将这气体装在一个坚固的容器中, 器內有一壁隔在中間, 壁上有一可以打开的小門, 由一守門者来管理; 这守門者可以是个类人妖, 也可以是个小的机械装置. 当大于平均速度的粒子从室A趋近門或小于平均速度的粒子从室B趋近門时, 守門者就打开門,粒子通过它;但当小于平均速度的粒子从室A趋近門或大于平均速度的粒子从室B趋近門时,門就被关上. 这样,室B中集中的高速度粒子在不断增加, 而室A的則不断減少. 这显然使熵不断減少; 因此,如果这时用一个热机把这两个室連接起来,我們似乎就得到第二类永动机.

拒絕由麦克士威尔妖产生的問題要比解答这个問題簡单. 否認这种东西或这种結构存在的可能性是最容易不过的事了. 实际上我們下面将看到,对一个处在平衡状态系統,严格意义上的麦克士威尔妖不可能存在; 可是如果我們一开始就接受这一点而不加以論証, 那我們就要失去一个难得的机会来学习关于熵和关于在物理学上、化学上、生物学上为可能的系統的知識.

麦克士威尔妖在动作以前, 必須收到有关前来的粒子的速度和它們碰到壁上的位置的信息. 因此, 无論在这些碰撞中是否发生能量的传递, 麦克士威尔妖和气体之間必然要有相互联系. 我們知道,熵增加定律只能适用于完全孤立的系統,并不适用于系統的非孤立部分. 因此, 我們要关心的仅仅是气体-妖这个系統的

熵，不是气体的熵．气体的熵仅仅是这个大系統的总熵的一部分．問題是，我們能不能同时求出麦克士威尔妖对总熵貢献的那一部分熵呢？

完全可以肯定，我們能．麦克士威尔妖只有根据收到的信息才能动作，而这些信息，如我們在下一章看到的，表示一負熵．信息必須通过某种物理过程来传递，譬如說通过某种形式的輻射来传递．这些信息当然完全可以在很低的能量下传递，而且粒子与麦克士威尔妖之間能量传递的意义一般比信息传递的意义小得多．但是，根据量子力学，如果我們不积极去影响試驗粒子的能量，使得它超过某一极小値（由試驗所用光的頻率决定），我們要得到有关粒子位置和动量的任何信息都是不可能的，要同时得到位置和动量的任何信息就更不可能了．因此，所有各种联系严格說来都是能量的耦合；一个处在統計平衡状态的系統，就是对熵和对能量这两者都达到平衡的系統．麦克士威尔妖早晚总要陷于和它周围温度相应的无規运动，正象萊布尼茨所說的某些单子(monads)一样，它收到大量的微小印象，以致陷于“暈头轉向”而沒有清楚的知覚．事实上，这时麦克士威尔妖已不再作为麦克士威尔妖而动作了．

虽然如此，在麦克士威尔妖失去調制力以前还是有一段相当显著的时間，我們可以認为它在这段时間中的动作状态是亚稳的．我們沒有理由認为亚稳的麦克士威尔妖事实上不存在；其实，我們完全可以認为酶就是亚稳的麦克士威尔妖，不过它的熵減少也許不是由于快粒子和慢粒子的分离，而是由于其他某种相当的过程．我們可以用这个見解来看待生命机体，例如人本身．酶和生命机体肯定都是亚稳的：酶的稳定状态就是失去調制力，生命机体的稳定状态就是死亡．所有的催化剂最終都要中毒：它們能够改变反应速度，但不能改变眞正的平衡状态．然而，催化剂和人都具有充分确定的亚稳状态，而且应当認为这些状态具有相对持久性．

在結束本章时，我想指出，各态历經理論是一个比以上討論的更广泛得多的論題．目前它又获得了某些发展，有人已經証明了，

对变换集保持不变的测度可以直接通过这个变换集自身来定义，不需預先假定它存在. 这里，我特别要提到克雷洛夫(Крылов)和波哥留波夫 (Боголюбов) 的工作，还有赫里維奇和日本学派的一些工作。

下一章专門討論时間序列的統計力学. 这是另外一个領域，在这个領域中，我們遇到的条件和热机統計力学中遇到的条件非常不同，因此它很适合用来作为生命机体变化过程的模型。

第 三 章

时間序列，信息和通訊

在很大一类現象中，我們所观測的往往是一个分布在各时刻的数量，或一系列数量. 連續記录的溫度計記录下来的溫度，股票交易所每日的股票牌价，气象局逐日公布的全部气象数据，都是連續的或离散的，簡单的或多重的时間序列. 这些时間序列都是变化比較慢的，很适合用笔算或用計算尺和計算机这类普通的数字計算工具来处理. 它們属于普通統計理論研究的范围.

电話綫、电視綫路或雷达装置部件中迅速变化着的电压序列，在一般現象中是不常見到的；它們同样属于統計学和时間序列理論的研究范围，虽然用来組合和变换这些电压的装置一般必須动作得很快，以便使輸出的結果能够和高速变化的輸入同步. 电話接受器、濾波器、貝尔电話研究所的伏考德（Vocoder）[1] 那样的声音自动編碼装置、調頻网絡和它的相应接受器，所有这些本質上都是高速演算的装置，它們抵得上整个統計研究室的全部計算机器、計算表和計算員. 如同防空炮火控制系統中的自动測距器和自动瞄准器一样，使用这些装置所必需的机巧是事先就設計在其中了. 这样做的原因和防空炮火控制系統的情形一样，都是由于操作过程工作得太快，不容許人去插手.

无論在計算工作室或在电話綫路中，时間序列和处理时間序列的装置都要涉及到信息的記录、儲藏、传递和使用等問題. 这里

1) 伏考德——"合成"电話的装置，在这种电話中，簡化了的指揮信号代替眞正的語言信号在通訊綫路上传輸，这些簡化的信号是在輸出端經过对語言的分析而产生的. 在接收端，經过指揮信号（它决定于音調的高低強弱和节律等）的操纵，原来的語言又被人工地合成出来. ——俄譯者注.

的信息是什么，如何测量它？最簡单最基本的信息形式，就是对两个具有相同几率的二中择一的簡单事件所作选择的記录，选择时不是这个事件就是那个事件一定要发生．例如，擲硬币时花或字的选择記录就是这种形式的信息．我們把一次这种二中择一的选择叫作一次决断．現在，如果事前已知某个量落在 A 和 B 之間，且以先驗的均匀几率落在这个区間中的任何一点，試求对这个量进行完全精确測量后获得的信息量．我們将看到，如果令 $A=0$ 和 $B=1$，并以二进位制的无穷二进位小数 $.a_1a_2\cdots a_n$ 表示这个变量，这里每个 $a_1, a_2, \cdots$ 的数值或为 0 或为 1，則所作选择的次数为无限次，因而所求的信息量为无限大．这里，

$$.a_1a_2\cdots a_n\cdots=\frac{1}{2}a_1+\frac{1}{2^2}a_2+\frac{1}{2^3}a_3+\cdots\frac{1}{2^n}a_n+\cdots \quad (3.01)$$

但是，任何实际进行的測量都不是完全精确的．如果測量具有一均匀分布的誤差，落在 $.b_1b_2\cdots b_n\cdots$ 范围内，这里 b_k 是头一位不等于 0 的数字，則所有从 a_1 到 a_{k-1}（可能还到 a_k）的决断才是有意义的，所有以后的决断都沒有意义．这时，需作决断的次数一定接近于

$$-\log_2 .b_1b_2\cdots b_n\cdots,^{1)} \quad (3.02)$$

我們将用这个量作为信息量的精确公式，同时就把它作为信息量的定义．

我們可以如下地来考虑这个定义：事前已知一变数落在 0 到 1 之間，事后得知它落在 $(0,1)$ 中的区間 (a,b) 上．于是我們从事后知識中得到的信息量为

$$-\log_2\frac{(a,b)\text{的測度}}{(0,1)\text{的測度}}. \quad (3.03)$$

然而，让我們現在来考虑另外一种情形：我們事前的知識是已知某个量应落在 x 到 $x+dx$ 之間的几率为 $f_1(x)dx$，事后的知識是得知这几率为 $f_2(x)dx$．試問，事后的知識給了我們多少新的信

1) $-\log_2 .b_1b_2\cdots b_n\cdots=\log_2\frac{1}{.b_1b_2\cdots b_n\cdots}$．——汉譯者注．

息？

这个問題实質上是把曲綫 $y = f_1(x)$ 和 $y = f_2(x)$ 下的区域的大小用某种寬度来表示[1]. 应当注意，我們这里要假定变数 x 具有基本均匀分布，就是説，如果用 x^3 或任何 x 的其他函数来代替 x，我們的結果一般不会相同. 由于 $f_1(x)$ 是几率密度，我們有：

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)dx = 1, \tag{3.04}$$

因而，$f_1(x)$ 下区域寬度的平均对数可以看成 $f_1(x)$ 倒数的对数之高度的某种平均. 因此，相应于曲綫 $f_1(x)$ 的信息量的合理測度为[2]：

$$\int_{-\infty}^{\infty} [\log_2 f_1(x)] f_1(x)\, dx. \tag{3.05}$$

这个我們把它定义为信息量的量，是通常在类似情况下定义为熵的那个量的負数. 虽然这定义是个統計学的定义，而且能代替費希尔(R. A. Fisher)統計方法中的定义，但它并不就是費希尔在研究統計問題时所下的那个定义.

特别，当 $f_1(x)$ 在 (a, b) 上为常数而在其他各处为 0 时，

$$\int_{-\infty}^{\infty} [\log_2 f_1(x)]\, f_1(x)dx = \frac{b-a}{b-a}\log_2 \frac{1}{b-a} = \log_2 \frac{1}{b-a}. \tag{3.06}$$

将上式所表示的信息与一处在(0, 1)区間中的点的信息比較，我們就得到差的測度：

$$\log_2 \frac{1}{b-a} - \log_2 1 = \log_2 \frac{1}{b-a}. \tag{3.07}$$

将变数 x 推广到在二元或多元区域上变动的变数时，上述信息量的定义仍然适用. 在二元的場合，函数 $f(x, y)$ 便得

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy\, f_1(x, y) = 1; \tag{3.08}$$

1) "用某种寬度来表示"——設 $a < b$, $x = a$ 和 $x = b$ 及 $y = f(x)$, $y = 0$ 所包括的部分的面积，便是 $a \leqq x \leqq b$ 的几率，信息量应当决定于几率. 表示这种信息的曲綫，可以将 $y = f(x)$ 的曲綫在各 x 上向 y 方向移动某种程度而得到. 这就叫作用某种寬度来表示.——日譯者注.

2) 这里引用了作者与馮·諾意曼的私人通信内容.

而信息量则为

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy\, f_1(x, y) \log_2 f_1(x, y). \tag{3.081}$$

注意，如果 $f_1(x, y)$ 的形式为 $\varphi(x)\psi(y)$，而且

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)\, dx = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(y)\, dy = 1, \tag{3.082}$$

则

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy\, \varphi(x)\psi(y) = 1; \tag{3.083}$$

并有

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy\, f_1(x, y) \log_2 f_1(x, y)$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} dx\, \varphi(x) \log_2 \varphi(x) + \int_{-\infty}^{\infty} dy\, \psi(y) \log_2 \psi(y); \tag{3.084}$$

即来自独立信源的信息量是可加的.

固定問題中一个或多个变数而求由此获得的信息量，是一个有趣的問題. 例如，假定变数 u 落在 x 到 $x + dx$ 之間的几率为 $\frac{1}{\sqrt{2\pi a}} e^{-\frac{x^2}{2a}} dx$，变数 v 落在同一范围内的几率为 $\frac{1}{\sqrt{2\pi b}} e^{-\frac{x^2}{2b}} dx$. 如果得知 $u + v = w$，我們由此获得多少关于 u 的信息？这里，显然有 $u = w - v$，而 w 的值是固定的. 我們假設 u 和 v 的事前分布是彼此独立的. 于是，u 的事后分布正比于

$$e^{-\frac{x^2}{2a}} e^{-\frac{(w-x)^2}{2b}} = c_1 e^{-(x-c_2)^2 \frac{a+b}{2ab}}, \tag{3.09}$$

式中 c_1 和 c_2 都是常数. 这两个常数在由于 w 固定而增加的信息量的表示式中都不出現.

当我們得知 w 的值时，关于 u 的信息量的增加由上式可知为

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi \frac{ab}{a+b}}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(x-c_2)^2 \frac{a+b}{2ab}} \left[-\frac{1}{2}\log_2 2\pi \frac{ab}{a+b} - \right.$$
$$\left. - (x - c_2)^2 \frac{a+b}{2ab}\right] dx - \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2a}} \left[-\frac{1}{2}\log_2 2\pi a - \right.$$
$$\left. - \frac{x^2}{2a}\right] dx = \frac{1}{2} \log_2 \frac{a+b}{b}. \tag{3.091}$$

注意，(3.091) 式的値是正的，且与 w 无关．它是 u 和 v 的均方的和除以 v 的均方的对数的一半．如果 v 只在小范围內变化，则由 $u+v$ 的知識提供我們关于 u 的信息量将很大，当 b 趋于 0 时它为无限大．

我們可以用下面的解释来考虑这个結果．我們把 u 当作消息而 v 当作噪声．于是，在无噪声存在时，由正确消息带来的信息量为无限大．有噪声存在时，信息量则是有限的，随着噪声強度的增加，它非常迅速地趋于 0．

我們說过，信息量是一个可以看作几率的量的对数的負数，它实質上就是負熵．下面我們来証明一件有趣的事：信息量的平均具有熵的各种性質．

令 $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 是两个几率密度；于是 $\frac{\varphi(x)+\psi(x)}{2}$ 也是一几率密度．我們有

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(x)+\psi(x)}{2}\log\frac{\varphi(x)+\psi(x)}{2}\,dx\leqslant$$

$$\leqslant\left\{\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\varphi(x)}{2}\log\varphi(x)dx+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\psi(x)}{2}\log\psi(x)\,dx\right\}.\tag{3.10}$$

这是由下一关系导出的：

$$\frac{a+b}{2}\log\frac{a+b}{2}\leqslant\frac{1}{2}(a\log a+b\log b).\tag{3.11}$$

换句話說，$\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 下区域的交迭，使得关于 $\varphi(x)+\psi(x)$ 的最大信息量减少．另一方面，如果 $\varphi(x)$ 是一在 (a,b) 以外为零的几率密度，则当 $\varphi(x)$ 在 (a,b) 上为 $\varphi(x)=\frac{1}{b-a}$ 而在其他各处为零时，

$$\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(x)\log\varphi(x)dx\tag{3.12}$$

是极小值．这是由于对数曲綫向上凸的原故．

如我們所应当預期的，信息損失的过程与熵增加过程十分相似．信息損失过程发生在原来是彼此分开的各个几率区域有相互融合的时候．例如，当我們把某个变数的分布用該变数之函数的分布来代替，而这函数对該变数的不同値取相同値时，或者，当我們允許一个多变数函数中的某个变数任意地在其自然变域上变动时，我們就損失信息．对消息作任何操作都不能使平均信息量增加．这里，热力学第二定律对通訊工程完全适用．反过来，对一暧昧事件的詳細整理，如我們所看到的，一般将使平均信息量增加，而不会損失信息．[1]

---

1) 設 $K(\varphi)=\begin{cases}\varphi\log\varphi, & \varphi>0\\ 0, & \varphi=0\end{cases}$，$b-a>0$，設想未必不相异的 n 个点，$(\varphi_i,K(\varphi_i))$ $(i=1,2,\cdots,n)$ $\left(但\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varphi_i=\frac{1}{b-a}\right)$ 如果在这些点上各个給予质量 $\frac{1}{n}$ 时的质量中心为 C，则

$$C=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varphi_i,\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K(\varphi i)\right)=\left(\frac{1}{b-a},\frac{1}{b-a}\sum_{i=1}^{n}\frac{b-a}{n}\cdot K(\varphi_i)\right).$$

这个点 C 属于包含上面 n 个点的最小的凸集合．因为 $\frac{d^2K(\varphi)}{d\varphi^2}=\frac{1}{\varphi}>0$，所以 $y=K(\varphi)$ 的曲綫在下方是凸的．所以重心 C 的縱座标是在 $K\left(\frac{1}{b-a}\right)$ 的上面．因此，$\sum_{i=1}^{n}\frac{b-a}{n}K(\varphi_i)\geqslant(b-a)K\left(\frac{1}{b-a}\right)=\log\frac{1}{b-a}$．(*) 在这里能成立等号的，只限于所有 n 个点都与 $\left(\frac{1}{b-a},K\left(\frac{1}{b-a}\right)\right)$ 一致的时候．如果当 $n\longrightarrow\infty$，那么这对于在 $a\leqslant x\leqslant b$ 中以密度 $\varphi(x)$ 分布的几率分布 $\left(\int_a^b\varphi(x)\,dx=1\right)$ 中，使得所得到的信息量 $\int_a^b\varphi(x)\log\varphi(x)dx$ 为最小的，只限于 $\varphi(x)=\frac{1}{b-a}$ 的时候，而且，这时候的信息量与 $\log\frac{1}{b-a}$ 相对应．

其次是如上面 (*) 所証明，如果在 $\varphi_i(i=1,2,\cdots,n)$ 之中愈接近于 $\frac{1}{b-a}$ 的値的东西，质量中心的縱座标便愈小．即信息量 $\int_a^b\varphi(x)\log\varphi(x)\,dx$，如果在 $\varphi(x)$ 中接近于 $\frac{1}{b-a}$ 的値的东西越多，便愈接近最小値 $\log\frac{1}{b-a}$．又上面的 $\log\frac{1}{b-a}$，如果 $(b-a)$ 愈大便愈小．即，几率分布的范围 $a\leqslant x\leqslant b$ 越广，那么对于此的信息的最小値 $\log\frac{1}{b-a}$ 便愈小．——日譯者注．

下面的情形是很有趣的．我們有一个变数为$(x_1,\cdots,x_n)$的n元几率分布密度$f(x_1,\cdots,x_n)$，同时还有m个非独立变数$y_1,\cdots,y_m$．当固定这m个变数时，我們由此获得的信息量是多少？首先，假定它們被固定在y_1^*, $y_1^*+dy_1^*$; $\cdots y_m^*$, $y_m^*+dy_m^*$之間．讓我們取$x_1, x_2, \cdots x_{n-m}, y_1, y_2, \cdots y_m$作为新的变数集合．这时，对新的变数集，我們的分布函数在$y_1^*\leqslant y_1\leqslant y_1^*+dy_1^*, \cdots, y_m^*\leqslant y_m\leqslant y_m^*+dy_m^*$决定的区域$R$上将与$f(x_1,\cdots,x_n)$成正比，而在$R$以外为零．因此，由于規定$y$而获得的信息量为

$$\frac{\underbrace{\int dx_1\cdots\int}_{R} dx_n f(x_1,\cdots,x_n)\log_2 f(x_1,\cdots,x_n)}{\underbrace{\int dx_1\cdots\int}_{R} dx_n f(x_1,\cdots,x_n)}$$

$$-\int_{-\infty}^{\infty} dx_1\cdots\int_{-\infty}^{\infty} dx_n f(x_1,\cdots,x_n)\log_2 f(x_1,\cdots,x_n)$$

$$=\frac{\int_{-\infty}^{\infty} dx_1\cdots\int_{-\infty}^{\infty} dx_{n-m}\left|J\begin{pmatrix}y_1^*,\cdots,y_m^*\\ x_{n-m+1},\cdots,x_n\end{pmatrix}\right|^{-1} f(x_1,\cdots,x_n)\log_2 f(x_1,\cdots,x_n)}{\int_{-\infty}^{\infty} dx_1\cdots\int_{-\infty}^{\infty} dx_{n-m}\left|J\begin{pmatrix}y_1^*,\cdots,y_m^*\\ x_{n-m+1},\cdots,x_n\end{pmatrix}\right|^{-1} f(x_1,\cdots,x_n)}$$

$$-\int_{-\infty}^{\infty} dx_1\cdots\int_{-\infty}^{\infty} dx_n f(x_1,\cdots,x_n)\log_2 f(x_1,\cdots,x_n). \quad (3.13)$$

(3.13)式的推广問題与下一問題有密切关系：在上述場合下，仅仅关于变数$x_1,\cdots,x_{n-m}$的信息是多少？我們知道，这些变数的**事前**几率密度为

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx_{n-m+1}\cdots\int_{-\infty}^{\infty} dx_n f(x_1,\cdots,x_n); \quad (3.14)$$

固定y^*后，未規格化的几率密度为

$$\Sigma\left|J\begin{pmatrix}y_1^*,\cdots,y_m^*\\ x_{n-m+1},\cdots,x_n\end{pmatrix}\right|^{-1} f(x_1,\cdots,x_n); \quad (3.141)$$

式中Σ表示对相应于給定一組y^*的所有$(x_{n-m+1},\cdots,x_n)$点集求和．在这个基础上，我們很容易就能写下問題的解答，虽然它少許

长些．如果把集$(x_1, \cdots, x_{n-m})$当作广义消息；把集$(x_{n-m+1}, \cdots, x_n)$当作广义噪声；把y^*当作被干扰后的广义消息．我們看到，我們給出了推广(3.13)問題的解．

这样，我們至少在形式上得到了推广前面提到的消息噪声問題的解．一組观測可以和一組已知其联合分布的消息和噪声具有任意的关系．我們要确定的是这些观察提供我們多少仅仅关于消息的信息．这是通訊工程的中心問題．根据这个問題，我們能够評价調幅、調頻或調相这类不同的調制方法，以至它們在传递信息方面的效率．这是个技术問題，这里不适宜作詳細討論；但多少还要說一說．首先，我們能証明：根据前面的信息定义，如果天空中杂乱"天电"的功率具有均匀的頻率分布，如果消息被限制在一定的頻带內，而且在这頻带內的輸出功率也是一定的，則任何传递信息的方法都沒有調幅方法的效率大，虽然其它方法也可以达到同样的效率．但是，对于用耳或任何其它給定的接受器来接受說，用調幅方法传递信息不一定是最适当的形式．这里，我們必須建立一个和上述理論极其类似的理論，来考虑耳和其他接受器的特殊性質．一般說，为了有效地使用調幅或任何其他的調制形式，必須輔助使用一个适当的譯碼装置，以便把收到的信息变换为适合人的接收器或机械接收器接收的形式．同样，原来的消息也必須代碼化，以便用最压縮的形式传递出去．这个問題在貝尔电話研究所設計伏考德系統时就已經解决了，至少部分地解决了，有关的一般理論也已由这个研究所的申农博士以非常令人滿意的形式提了出来[1)]．

測量信息的定义和方法就是如此．下面我們来討論一种可以使信息具有对时間均勻的形式的方法．我們知道，电話和其他通信工具在实际上大都不依賴于特定的时間原点．誠然，有一种操作似乎与此矛盾，但其实不是这样．这是指調制操作．最簡单的調制形式是把消息$f(t)$变換为$f(t)\sin(at+b)$的形式．但是，如果我們把因子$\sin(at+b)$当作插进装置中的額外消息，这种情况

1) 詳見 C. E. Shannon, "The mathematical Theory of Communication", Univ, of Illinois Press, 1949.——日譯者注．

就可以归入上述一般理論的范围加以討論．我們称为載波的这个額外消息，并不使通訊系統的单位时間信息輸送量有任何增加．它所包含的全部信息在任意短的时間間隔內被传递出去，以后，就不再有什么新的信息了．

因此，一个时間上均匀的消息，或者如統計学家所称的，一个处在統計平衡的时間序列，就是这样的一个时間函数或时間函数集：它是由許多这种函数集构成的系綜中的一个元，系綜中每个元都有一可定义的几率，而且当时間 t 变为 $t+\tau$ 时，这几率分布不变．就是說，如果 T^{λ} 是使 $f(t)$ 变为 $f(t+\lambda)$ 的运算子，則系綜的几率对于 T^{λ} 构成的变换羣保持不变．这个羣滿足性質：

$$T^{\lambda}[T^{\mu}f(t)]=T^{\mu+\lambda}f(t)(-\infty<\lambda<\infty,-\infty<\mu<\infty). \quad (3.15)$$

由此可知，如果 $\Phi\{f(t)\}$ 是 $f(t)$ 的汎函（即一依賴于 $f(t)$ 在 t 由 $-\infty$ 到 ∞ 中的全部历史的数），且 $f(t)$ 对整个系綜的平均是有限的，我們就可以引用上一章的貝克荷夫各态历經定理而得出結論：除了对几率为零的 $f(t)$ 的数値集以外，$\Phi\{f(t)\}$ 的时間平均

$$\lim_{A\to\infty}\frac{1}{A}\int_0^A\Phi\{f(t+\tau)\}d\tau=\lim_{A\to\infty}\frac{1}{A}\int_{-A}^0\Phi\{f(t+\tau)\}d\tau \quad (3.16)$$

是存在的．

此外还有一結果．我們在上一章講到过另一个由馮·諾意曼提出的关于各态历經理論的定理，这个定理說，如果一系統在保測变换羣（3.15）作用下仍变为自身，則除了对几率为0的元以外，系統的任一个元都属于在同一变換羣作用下仍变为自身的某一子集（可以是整个系統自身），这子集具有一定义在自身上的測度，它在上述变換羣作用下也保持不变；此外，这子集还有如下的性質：如果它的任一部分具有对上述变換羣保持不变的測度，則这測度或者等于整个子集的測度，或者为零[1]．如果我們不考

1）如果把在这里所講的事用符号来写便成为下面这样：把 Ω 作为函数的系綜(ensemble)的全体，把 N 作为“除外系綜”．Ω 中有測度 m 的定义 $m(N)=0$，$\Omega-N$ 分为所謂“各态历經部分” Ω_{λ} 的直和．Ω_{λ} 对于保測变換羣不变，而且有不变測度 m_{λ}，如果 Ω_{λ} 的部分系綜 M_{λ} 对于 F 不变，則 $m_{\lambda}(M_{\lambda})=m_{\lambda}(\Omega_{\lambda})$ 或者 0．——日譯者注．

虑所有不属于这子集[1] 的元，幷使用它的适当的測度，我們将发現，时間平均 (3.16) 几乎在所有情况下都是 $\Phi\{f(t)\}$ 在整个 $f(t)$ 函数空間上的平均，即所謂相平均. 因此，在上述函数 $f(t)$ 的系綜的場合，除了对几率为零的情形，我們都能用时間平均代替相平均的方法，根据系綜中任一时間序列的記录，以求出系綜的任一統計参数的平均——实际上我們能同时求出系綜的任一可数統計参数集. 而且，我們几乎只要知道这些时間序列中的任何一个序列的过去就够了. 換句話說，当給定已知属于一統計平衡系綜的某一时間序列在現在以前的全部历史时，我們就能以誤差几率为零的精度計算出該时間序列所属的統計平衡系綜的整个統計参数集. 上面表述的理論都是对簡单时間序列而言的；但这些理論对于具有几个同时变化的变量而非具有一个变量的多重时間序列同样正确.

我們現在可以用上述理論来討論有关时間序列的各种問題了. 我們只限于考虑如下場合的时間序列：它的全部过去能够用可数个量的集决定. 例如，对于范围很广的一类函数 $f(t)(-\infty < t < +\infty)$，当已知一組量

$$a_n = \int_{-\infty}^{0} e^t t^n f(t)\,dt \quad (n = 0, 1, 2, \cdots) \tag{3.17}$$

时，f 就完全被决定. 令 A 为未来的 t 值的某一函数，即 A 为大于零的 t 值的函数. 于是，当函数 f 集[2]在最窄狭可能的意义上被取定时，我們就能根据几乎任意一个时間序列的过去来决定 $(a_0, a_1, \cdots, a_n, A)$ 的同时分布. 特别，如果 $a_0, \cdots, a_n$ 全部給定，A 的分布就可以决定. 这里，我們要用到尼可杜 (Nikodym) 关于条件几

1) 即 $f \notin N$，因之对于某 λ 是 $f \in \Omega_\lambda$，作为測度而使用 m_λ (m_λ 对于 Ω_λ 的部分系綜以外的 Ω 的任意的部分系綜 M，同时都是 $m_\lambda(M)=0$). Ω_λ 是各态历經的，所以用 m_λ 測量把測度为 0 的 $f \in \Omega_\lambda$ 除去，(3.16)便等于 $\int_{\Omega\lambda} \Phi(f(t))m_\lambda(df)$.——日譯者注.

2) 意思是在上面所說的时間平均 = 相平均 能使用的那种統計的平衡的系綜中选取出来的 f.——日譯者注.

率的著名定理. 由这个定理可知，在很普遍的情况下，这分布当 $n \to \infty$ 时收斂到一极限，而这个极限分布将提供我們关于任一未来量分布的全部知識. 同样，如果知道了过去，我們就可以决定任何一組未来量的数值的同时分布，或任何一組决定于过去和未来两方面的量的数值的同时分布. 因此，如果我們对任何統計参数或統計参数集的"最优值"都能作出适当的解释——多半是在平均值或中值或众值的意义上，我們就能由这个已知分布把它們計算出来，得到一个就其优良程度而言能够满足我們所要求的預測准則的預測. 我們能够用任意的統計估計方法——均方誤差或最大誤差或平均絕对誤差等等，来計算这預測的价值. 我們能够計算因固定过去而提供我們的关于任一統計参数或統計参数集的信息量. 由关于过去的知識，我們甚至能計算某一瞬間以后全部未来的总信息量. 由于我們一般地能够由过去推知未来，所以，即使上述的瞬間就是現在，我們关于現在的知識中也会包含无限大的信息量.

另一有趣的情形是多重时間序列的情形，在这情形下，我們仅仅精确地知道它的若干成分的过去. 任何一个不仅仅依賴于这些过去的量的分布，都能用十分类似上述的方法来研究. 特別，我們可以推知其他成分的数值或其他一組成分的数值集在过去、現在或未来某一瞬間的分布. 滤波器的一般問題就属于这一类問題. 假定消息和噪声以一定方式混合为一个被扰乱了的消息，而我們知道这被扰乱消息的过去. 我們也知道作为时間序列的这消息和噪声的統計联合分布. 現在要求过去、現在或未来某一瞬間的消息分布. 就是說，我們要求出一个作用于被扰乱消息的过去的运算子，它能在一定的統計意义上最优地給出眞实的消息. 我們可以得到一个估計消息的誤差程度的統計估計方法. 最后，我們可以計算由这消息获得的信息量.

下面一种时間序列系綜特別簡单而重要. 这就是布朗运动的时間序列系綜. 布朗运动是气体中粒子受到其他作热运动的粒子的无規則碰撞而产生的一种运动. 这方面的理論是由爱因斯坦、斯

莫路绰斯基、皮林和作者[1]等许多学者发展起来的．在布朗运动的场合，除非我们采取的时间间隔非常小，使得粒子之间的个别碰撞都能一一分辨出来，否则粒子的运动将呈现一种奇妙的不可微性．在给定时间内，粒子在任一给定方向上位移的平方平均和时间长度成正比，而且在相继各时间间隔内的运动彼此完全不相关．这和物理观测的结果非常符合．如果我们把布朗运动的标度规格化为时间标度，而且只考虑运动在坐标 x 上的分量，并假设 $x(t)$ 在 $t=0$ 时等于 0，则当 $0\leqslant t_1\leqslant t_2\leqslant\cdots\leqslant t_n$ 时，粒子在时间 t_1 落在 x_1 到 x_1+dx_1 之间，……，在时间 t_n 落在 x_n 到 x_n+dx_n 之间的几率为

$$\frac{\exp\left(-\frac{x_1^2}{2t_1}-\frac{(x_2-x_1)^2}{2(t_2-t_1)}-\cdots-\frac{(x_n-x_{n-1})^2}{2(t_n-t_{n-1})}\right)}{\sqrt{|(2\pi)^n t_1(t_2-t_1)\cdots(t_n-t_{n-1})|}}dx_1\cdots dx_n. \tag{3.18}$$

在与此对应的有确定值的这个几率系统的基础上，我们能够用一个介于 0 到 1 之间的参数 α 来表示各种可能的布朗运动路径的集合，每一路径表示为一函数 $x(t,\alpha)$，这里，x 由时间 t 和分布参数 α 决定（任一路径含于某一集 S 的几率等于 S 中相应路径的 α 值的集合的测度）．这样一来，几乎所有的路径都是连续的，但是不可微的．

决定 $x(t_1,\alpha)\cdots x(t_n,\alpha)$ 对 α 的平均，是一个很有趣的问题．在 $0\leqslant t_1\leqslant\cdots\leqslant t_n$ 的假定下，这个平均是

$$\begin{aligned}&\int_0^1 d\alpha x(t_1,\alpha)x(t_2,\alpha)\cdots x(t_n,\alpha)\\&=(2\pi)^{-\frac{n}{2}}[(t_1(t_2-t_1)\cdots(t_n-t_{n-1})]^{-\frac{1}{2}}\times\\&\times\int_{-\infty}^{\infty}d\xi_1\cdots\int_{-\infty}^{\infty}d\xi_n\cdot\xi_1\xi_2\cdots\xi_n\exp\left(-\frac{\xi_1^2}{2t_1}-\frac{(\xi_2-\xi_1)^2}{2(t_2-t_1)}-\right.\\&\left.-\cdots-\frac{(\xi_n-\xi_{n-1})^2}{2(t_n-t_{n-1})}\right).\end{aligned} \tag{3.19}$$

1) Paley, R. E. A. C. 和 Wiener, N., "Fourier Transforms in the Complex Domain". Colloquium Publications, Vol. 19, *American Math. Soc.*, New York, 1934, Chapter.

令

$$\xi_1\cdots\xi_n=\sum A_k\xi_1^{\lambda_{k,1}}(\xi_2-\xi_1)^{\lambda_{k,2}}\cdots(\xi_n-\xi_{n-1})^{\lambda_{k,n}}, \tag{3.20}$$

式中 $\lambda_{k,1}+\lambda_{k,2}+\cdots+\lambda_{k,n}=n$。(3.19)式的值将变为

$$\sum A_k(2\pi)^{-\frac{n}{2}}[t_1^{\lambda_{k,1}}(t_2-t_1)^{\lambda_{k,2}}\cdots(t_n-t_{n-1})^{\lambda_{k,n}}]^{-\frac{1}{2}}\times$$

$$\times\prod_j\int_{-\infty}^{\infty}d\xi\cdot\xi^{\lambda_{k,j}}e^{-\frac{\xi^2}{2(t_j-t_{j-1})}}$$

$$=\sum A_k\prod_j\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\xi^{\lambda_{k,j}}e^{-\frac{\xi^2}{2}}\cdot d\xi(t_j-t_{j-1})^{-\frac{1}{2}}$$

$$=\begin{cases}0,\text{若任一 }\lambda_{k,j}\text{ 为奇数;}\\ \sum_k A_k\prod_j(\lambda_{k,j}-1)(\lambda_{k,j}-3)\cdots5\cdot3\cdot(t_j-t_{j-1})^{-\frac{1}{2}},\end{cases} \tag{3.21}$$

若每一 $\lambda_{k,j}$ 都为偶数，

$$=\sum_k A_k\prod_j(\text{把 }\lambda_{k,j}\text{ 个項划分成对的方法的数目})\times(t_j-t_{j-1})^{-\frac{1}{2}}$$

$=\sum_k A_k$（把 n 个項按如下方式划分成对的方法的数目：使 $n=\sum\lambda_{k,j}$，并把它分成 $\lambda_{k,j}$ 个項的組的时候，被划分好的任何一对的双方都属于同一个組）$\times(t_j-t_{j-1})^{-\frac{1}{2}}$，

$$=\sum_j A_j\sum\prod\int_0^1 d\alpha[x(t_k,\alpha)-x(t_{k-1},\alpha)]\times[x(t_q,\alpha)-x(t_{q-1},\alpha)]^{1)},$$

---

1) $\int_0^1 d\alpha\,[x(t_k,\alpha)-x(t_{k-1},\alpha)]\,[x(t_q,\alpha)-x(t_{q-1},\alpha)]=$ $\int_0^1 d\alpha\cdot x(t_k,-t_{k-1},\alpha)\,x(t_q-t_{q-1},\alpha)$，这个式子在 $k\neq q$ 的时候等于 0［对于相异的区間 (t_{k-1},t_k) 和 (t_{q-1},t_q) 来說，$x(t_k-t_{k-1},\alpha)$ 和 $x(t_q-t_{q-1},\alpha)$ 是独立的，因为各个的平均值都是 0］，如果 $k=q$，則上式 $=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\xi^2\frac{1}{\sqrt{t_k-t_{k-1}}}\exp\left(-\frac{\xi^2}{2(t_k-t_{k-1})}\right)d\xi=(t_k-t_{k-1})$。——日譯者注。

式中第一个 $\sum$ 是对 j 求和；第二个 $\sum$ 是对所有把 n 项分成相应个数目为 $\lambda_{k,1}\lambda_{k,2},\cdots\lambda_{k,n}$ 的块后再分成一对对的方法求和；Π 是对如下的 k 和 q 的数值对取积：其中从 t_k 及 t_q 选出的 $\lambda_{k,1}$ 元素是 t_1，$\lambda_{k,2}$ 是 t_2，以下类推．由此直接得出如下结果：

$$\int_0^1 d\alpha x(t_1,\alpha)x(t_2,\alpha)\cdots x(t_n,\alpha)$$
$$=\sum\prod\int_0^1 d\alpha x(t_j,\alpha)x(t_k,\alpha), \tag{3.22}$$

式中 $\sum$ 是对所有把 $t_1,\cdots t_n$ 划分为不同对的划分方法求和，Π 是对每一种划分中所有的对取积． 换句话说，当我们知道一对一对 $x(t_j,\alpha)$ 的乘积的平均时，我们就知道 $x(t_j,\alpha)$ 的所有多项式的平均，因而也就知道它们的整个统计分布．

以上我们考虑的是 t 为正的布朗运动 $x(t,\alpha)$．如果令

$$\begin{cases}\xi(t,\alpha,\beta)=x(t,\alpha) & (t\geqslant 0);\\ \xi(t,\alpha,\beta)=x(-t,\beta) & (t<0),\end{cases} \tag{3.23}$$

式中 α 和 β 彼此独立地均匀分布在 $(0,1)$，我们就得到 t 跑过整个实数轴的 $\xi(t,\alpha,\beta)$ 的分布．有一种大家都知道的数学方法，能把一个正方形映象到一线段上，使得面积变为长度． 为此我们只须将正方形内各点的坐标写为十进位制形式：

$$\alpha=0.\alpha_1\alpha_2\cdots\alpha_n\cdots;\quad \beta=0.\beta_1\beta_2\cdots\beta_n\cdots; \tag{3.24}$$

并令

$$\gamma=0.\alpha_1\beta_1\alpha_2\beta_2\cdots\alpha_n\beta_n;$$

这样我们就得到上述性质的映象：线段上的点和正方形中的点几乎是一一对应的．利用这种变换，我们定义

$$\xi(t,\gamma)=\xi(t,\alpha,\beta). \tag{3.25}$$

现在我们要来定义

$$\int_{-\infty}^{\infty}K(t)d\xi(t,\gamma). \tag{3.26}$$

显然，我们应当把它定义为斯蒂尔脱耶斯积分[1]；但 ξ 是 t 的非常

1) Stieltjes, *Annales de la Fac. des Sc. de Toulouse*", 1894, p. 165; Lebesgue, H., *Lecons sur L'Intégration*, Gauthier-Villars et Cie, Paris, 1928.

不规則函数，因此直接作这样的定义是不可能的事．然而，如果当 $t\to\infty$ 时 K 足够快地趋于零,而且是足够光滑的函数，我們就有理由考虑其部分积分

$$\int_{-\infty}^{\infty}K(t)d\xi(t,\gamma)=-\int_{-\infty}^{\infty}K'(t)\xi(t,\gamma)\,dt. \tag{3.27}$$

在这些条件下,我們形式上有

$$\begin{aligned}&\int_0^1 d\gamma\int_{-\infty}^{\infty}K_1(t)\,d\xi(t,\gamma)\int_{-\infty}^{\infty}K_2(t)\,d\xi(t,\gamma)\\&=\int_0^1 d\gamma\int_{-\infty}^{\infty}K_1'(t)\xi\,(t,\gamma)\,dt\int_{-\infty}^{\infty}K_2'(t)\,\xi\,(t,\gamma)\,dt\\&=\int_{-\infty}^{\infty}K_1'(s)\,ds\int_{-\infty}^{\infty}K_2'(t)\,dt\int_0^1\xi(s,\gamma)\,\xi\,(t,\gamma)\,d\gamma.\end{aligned} \tag{3.28}$$

如果 s 和 t 的符号相反,則

$$\int_0^1\xi(s,\gamma)\,\xi\,(t,\gamma)\,d\gamma=0; \tag{3.29}$$

但如果符号相同,且 $|s|<|t|$,則

$$\begin{aligned}&\int_0^1\xi(s,\gamma)\,\xi\,(t,\gamma)\,d\gamma=\int_0^1 x(|s|,\alpha)x(|t|,\alpha)\,d\alpha\\&=\frac{1}{2\pi\sqrt{|s|(|t|-|s|)}}\int_{-\infty}^{\infty}du\int_{-\infty}^{\infty}dv\cdot uv\exp\left(-\frac{u^2}{2|s|}-\frac{(v-u)^2}{2(|t|-|s|)}\right)\\&=\frac{1}{\sqrt{2\pi|s|}}\int_{-\infty}^{\infty}u^2\exp\left(-\frac{u^2}{2|s|}\right)du\\&=|s|\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}u^2\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)du=|s|.\end{aligned} \tag{3.30}$$

因此，

$$\begin{aligned}&\int_0^1 d\gamma\int_{-\infty}^{\infty}K_1(t)\,d\xi(t,\gamma)\int_{-\infty}^{\infty}K_2(t)\,d\xi(t,\gamma)\\&=-\int_0^{\infty}K_1'(s)\,ds\int_0^s tK_2'(t)\,dt-\int_0^{\infty}K_2'(s)\,ds\int_0^s tK_1'(t)\,dt+\\&\quad+\int_{-\infty}^{0}K_1'(s)\,ds\int_s^0 tK_2'(t)\,dt+\int_{-\infty}^{0}K_2'(s)\,ds\int_{\infty}^0 tK_1'(t)\,dt\\&=-\int_0^{\infty}K_1'(s)\,ds\left(sK_2(s)-\int_0^s K_2(t)\,dt\right)-\end{aligned}$$

$$-\int_0^\infty K_2'(s)ds\left(sK_1(s)-\int_0^s K_1(t)dt\right)+$$

$$+\int_{-\infty}^0 K_1'(s)ds\left(-sK_2(s)-\int_s^0 K_2(t)dt\right)+$$

$$+\int_{-\infty}^0 K_2'(s)ds\left(-sK_1(s)-\int_s^0 K_1(t)\,dt\right)$$

$$=-\int_{-\infty}^\infty sd[K_1(s)K_2(s)]=\int_{-\infty}^\infty K_1(s)K_2(s)ds. \tag{3.31}$$

特别,

$$\int_0^1 d\gamma\int_{-\infty}^\infty K(t+\tau_1)\,d\xi(t,\gamma)\int_{-\infty}^\infty K(t+\tau_2)\,d\xi(t,\gamma)$$

$$=\int_{-\infty}^\infty K(s)K(s+\tau_2-\tau_1)\,ds. \tag{3.32}$$

而且,

$$\int_0^1 d\gamma\prod_{k=1}^n\int_{-\infty}^\infty K(t+\tau_k)\,d\xi(t,\gamma)$$

$$=\sum\prod\int_{-\infty}^\infty K(s)K(s+\tau_j-\tau_k)\,ds, \tag{3.33}$$

式中$\sum$是对把 $\tau_l,\cdots,\tau_n$ 划分成对的所有划分方法求和,$\prod$ 是对每种划分中的各对取积.

表示式

$$\int_{-\infty}^\infty K(t+\tau)\,d\xi(\tau,\gamma)=f(t,\gamma) \tag{3.34}$$

是一个依賴于分布参数 γ 的变数 t 的十分重要的时間序列系綜.以上的証明可总結如下: $f(t,\gamma)$ 分布的所有統計参数都依賴于函数

$$\Phi(\tau)=\int_{-\infty}^\infty K(s)K(s+\tau)ds$$

$$=\int_{-\infty}^\infty K(s+t)K(s+t+\tau)\,ds. \tag{3.35}$$

这个函数就是統計学家称为的自相关函数. 因此,$f(t,\gamma)$ 分布的統計和 $f(t+\tau,\gamma)$ 分布的統計相同;事实上,我們可以証明,如果

$$f(t+t_1,\gamma)=f(t,\Gamma), \tag{3.36}$$

則从 γ 到 Γ 的变换是保測变换. 換句話說，时間序列 $f(t, \gamma)$ 处在統計平衡中.

而且，如果我們考虑平均

$$\left[\int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau)\, d\xi(t, \gamma)\right]^m \left[\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\sigma-\tau)\, d\xi(t, \gamma)\right]^n, \tag{3.37}$$

它正好包括

$$\int_0^1 d\gamma \left(\int_{-\infty}^{\infty} K(t-\tau)\, d\xi(t, \gamma)\right)^m \int_0^1 d\gamma \left(\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\sigma-\tau)\, d\xi(t, \gamma)\right)^n \tag{3.38}$$

中的項以及

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(\sigma+\tau) K(\tau)\, d\tau \tag{3.39}$$

的自乘作为因子的有限个項；如果 (3.39) 在 $\sigma \to \infty$ 时趋于 0，則 (3.38) 将是 (3.37) 的极限. 換句話說，当 $\sigma \to \infty$ 时，$f(t,\gamma)$ 分布和 $f(t+\sigma, \gamma)$ 分布是趋近不相关的. 用更普遍的但完全类似的方法，我們能証明，$f(t_1, \gamma), \cdots, f(t_n, \gamma)$ 和 $f(\sigma+s_1, \gamma), \cdots, f(\sigma+s_m, \gamma)$ 的同时分布当 $\sigma \to \infty$ 时趋于第一組和第二組分布的联合分布. 換句話說，任一依賴于 t 的函数 $f(t, \gamma)$ 的整个数値分布的有界可測汎函或有界可測量(可以把它写成 $\mathfrak{F}\{f(t,\gamma)\}$ 的形式)，都一定具有下列性質：

$$\lim_{\sigma\to\infty} \int_0^1 \mathfrak{F}\{f(t,\gamma)\} \mathfrak{F}\{f(t+\sigma,\gamma)\} d\gamma = \left[\int_0^1 \mathfrak{F}\{f(t,\gamma)\} d\gamma\right]^2. \tag{3.40}$$

如果 $\mathfrak{F}\{f(t, \gamma)\}$ 对 t 的平移不变，而且它只取 0 或 1 的値，則我們有

$$\int_0^1 \mathfrak{F}\{f(t, \gamma)\}\, d\gamma = \left[\int_0^1 \mathfrak{F}\{f(t, \gamma)\}\, d\gamma\right]^2, \tag{3.41}$$

因而 $f(t, \gamma)$ 到 $f(t+\sigma, \gamma)$ 的变換羣是度量可迁羣. 由此可知，如果 $\mathfrak{F}\{f(t, \gamma)\}$ 是 f 的任一作为 t 的函数的可积汎函，則根据各态历經定理，除了对測度为 0 的 γ 集以外，对其他所有的 γ 値，我們有

$$\begin{aligned}
&\int_0^1 \mathfrak{F}\{f(t,\gamma)\}\,d\gamma \\
&=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T \mathfrak{F}\{f(t,\gamma)\}\,dt \\
&=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T}^0 \mathfrak{F}\{f(t,\gamma)\}\,dt.
\end{aligned} \tag{3.42}$$

这就是說，我們几乎完全能根据时間序列系綜中某一个例样的过去历史，讀取这时間序列的任一統計参数，甚至讀取任一統計参数的可列集．实际上，对于这时間序列，当我們知道

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T}^0 f(t,\gamma)\,f(t-\tau,\gamma)\,dt \tag{3.43}$$

时，我們就知道几乎每一場合的$\Phi(t)$，因而就有了关于这时間序列的完备的統計知識．

有一些由这种时間序列决定的量具有十分有趣的性質．特别，我們求

$$\exp\left(i\int_{-\infty}^{\infty}K(t)\,d\xi(t,\gamma)\right) \tag{3.44}$$

的平均值是很有趣的．形式上，这个平均値可以写成

$$\begin{aligned}
&\int_0^1 d\gamma\sum_{n=0}^{\infty}\frac{i^n}{n!}\left[\int_{-\infty}^{\infty}K(t)\,d\xi(t,\gamma)\right]^n \\
&=\sum_m\frac{(-1)^m}{(2m)!}\left[\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2dt\right]^m(2m-1)(2m-3)\cdots5\cdot3\cdot1 \\
&=\sum_m^{\infty}\frac{(-1)^m}{2^m m!}\left[\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2dt\right]^m \\
&=\exp\left[-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t)]^2dt\right].
\end{aligned} \tag{3.45}$$

用簡单的布朗运动序列来建立一个尽可能一般的时間序列，也是一个很有趣的尝試的問題．富里埃展开的例子提示我們，在作这个尝試时，象(3.44)那样的展开式是一个适合这目的的很方便的組成要素．現在让我們来研究下列特殊形式的时間序列：

$$\int_a^b d\lambda \exp\left[i\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau,\lambda)\, d\xi(\tau,\gamma)\right]. \tag{3.46}$$

假定我們已知(3.46)式和其中的 $\xi(\tau,\gamma)$，則如(3.45)的情形一样，如果 $t_1 > t_2$，我們有

$$\int_0^1 d\gamma \exp\left[is\left(\xi(t_1,\gamma)-\xi(t_2,\gamma)\right)\right]\times$$

$$\times \int_a^b d\lambda \exp\left[i\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau,\lambda)\, d\xi(t,\gamma)\right]$$

$$=\int_a^b d\lambda \exp\left[-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2 dt-\frac{s^2}{2}(t_2-t_1)-s\int_{t_2}^{t_1}K(t,\lambda)\,dt\right]. \tag{3.47}$$

以 $e^{\frac{s^2(t_2-t_1)}{2}}$ 乘以上式两端，并令 $s(t_2-t_1)=i\sigma$，然后使 $t_2=t_1$，則得

$$\int_a^b d\lambda \exp\left[-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2 dt - i\sigma K(t_1,\lambda)\right]. \tag{3.48}$$

我們以$K(t_1, \lambda)$ 作为一新的独立变数 μ，并解出 λ，得

$$\lambda = Q(t_1,\mu). \tag{3.49}$$

于是(3.48)变为

$$\int_{K(t_1,a)}^{K(t_1,b)} e^{i\mu\sigma} d\mu \frac{\partial Q(t_1,\mu)}{\partial\mu} \exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\{K[t+\tau,Q(t_1,\mu)]\}^2 dt\right). \tag{3.50}$$

运用富里埃变换，我們由上式能将

$$\frac{\partial Q(t_1,\mu)}{\partial\mu} \exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\{K[t+\tau,Q(t_1,\mu)]\}^2 dt\right) \tag{3.51}$$

表示为 μ 的函数，当 μ 是在 $K(t_1, a)$ 和 $K(t_1, b)$ 之間变动时，如果把这个函数对 μ 积分，則得

$$\int_a^\lambda d\lambda \exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2\, dt\right), \tag{3.52}$$

它是 $K(t_1, \lambda)$ 和 t_1 的函数． 这就是說，存在一巳知函数 $F(u, v)$，使得

$$\int_a^\lambda d\lambda \exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t+\tau,\lambda)]^2\, dt\right)=F(K(t_1,\lambda),t_1). \tag{3.53}$$

由于上式左端与 t_1 无关,我們可以把它写作 $G(\lambda)$, 而得到

$$F(K(t_1, \lambda), t_1) = G(\lambda). \tag{3.54}$$

式中 F 是一已知函数,我們可以解出它的第一个变数,而得到

$$K(t_1, \lambda) = H(G(\lambda), t_1), \tag{3.55}$$

式中 $H(u, v)$ 也是一已知函数. 于是我們有

$$G(\lambda) = \int_a^\lambda d\lambda \exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[H(G(\lambda), t+\tau)]^2\, dt\right). \tag{3.56}$$

因此,函数

$$\exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[H(u,t)]^2\, dt\right) = R(u) \tag{3.57}$$

是一已知函数,而且

$$\frac{dG}{d\lambda} = R(G), \tag{3.58}$$

即

$$\frac{dG}{R(G)} = d\lambda, \tag{3.59}$$

或

$$\lambda = \int \frac{dG}{R(G)} + \text{常数} = S(G) + \text{常数}. \tag{3.60}$$

这个常数由下式定出:

$$G(a) = 0 \tag{3.61}$$

或

$$a = S(0) + \text{常数}. \tag{3.62}$$

不难看出,如果 a 是有限的,它取任何值都可以,因为在任一 λ 的数值上加上一个常数时以上的計算不受影响. 因此,我們可以令(3.62)中的常数为 0. 这样,λ 作为 G 的函数就被决定,因而 G 作为 λ 的函数也被决定. 于是,由(3.55)我們就能决定 $K(t, \lambda)$. 为了决定(3.46)式,我們只需要知道 b. 但是比較以下两式就能定出 b:

$$\int_a^b d\lambda \exp\left(-\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}[K(t,\lambda)]^2\, dt\right) \tag{3.63}$$

和

$$\int_0^1 d\gamma \int_a^b d\lambda \exp\left(i\int_{-\infty}^{\infty} K(t,\lambda)\, d\xi(t,\gamma)\right). \tag{3.64}$$

因此，在一定条件下（这些条件需要严格地加以陈述），如果一时間序列可写成(3.46)的形式，同时又知道$\xi(t, \gamma)$，则除了a，λ和b附加的未定常数以外，(3.46)中的函数$K(t, \lambda)$和数a及b都能决定. 即使当$b = +\infty$时，我們也不会有什么困难. 当然，不难把上述討論推广到$a = -\infty$的情形. 虽然目前还需要研究其反函数不是单值的那些函数的問題，以及其相应展开能否有效的普遍条件；但我們至少在解决把很大一类时間序列簡化为典型形式的問題上向前跨进了一步，而这一点，如本章前面所大略提到的，对于預測理論和信息測量理論具有头等重要的意义.

在上述研究时間序列理論的途径上，我們还应当取消一个明显的限制. 这个限制就是：我們必須已知$\xi(t, \gamma)$，而且所考虑的时間序列必須能展成(3.46)的形式. 这个問題就是：在什么条件下，我們才能把一个已知其統計参数的时間序列表成一个布朗运动的时間序列，或者，至少把它表成这种或那种意义上的布朗运动时間序列的极限？我們将限于考虑具有度量可迁性质的时間序列，甚至具有更强的性質的时間序列：如果我們取出相距很远的，有固定长度的各时間段，在各时間段中的时間序列的任何汎函的分布彼此是近于无关的，就象各时間段彼此无关那样[1]. 应当在这方面发展的理論已經大体上由作者完成了.

如果$K(t)$是一充分連續的函数，则由卡斯 Kac 定理，我們能够証明，

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\, d\xi(\tau, \gamma) \tag{3.65}$$

的零点几乎总是具有确定的密度，而且，适当地选取K，能够使这密度任意的大. 令选择的K为K_D，使得这密度为D. 我們用

1) 这就是柯普曼的混合性，它是証明統計学各态历經假設的充分和必要条件.

$Z_n(D,\gamma)$表示$\int_{-\infty}^{\infty} K_D(t+\tau)\, d\xi(\tau,\gamma)$由 $-\infty$ 到 ∞ 的零点序列，$-\infty < n < \infty$. 当然，在决定这些零点时，我們所确定的 n 附加了一整常数.

令 $T(t,\mu)$为連續变数 t 的任一时間序列，而 μ 是这时間序列的分布参数，均匀分布在(0,1)上. 再令

$$T_D(t,\mu,\gamma) = T[t - Z_n(D,\gamma), \mu], \tag{3.66}$$

式中的 Z_n 取正好先于 t 的一个零点. 可以証明，对于 t 数值的任何有限集 $t_1, t_2, \cdots, t_\nu, T_D(t_\kappa,\mu,\gamma)$ $(\kappa = 1, 2, \cdots, \nu)$ 的同时分布当 $D \to \infty$ 时几乎对所有的 μ 值都趋于同一 t_k 的 $T(t_k,\mu)$ 的同时分布. 但是，$T_D(t,\mu,\gamma)$ 完全由 t, μ, D 和 $\xi(\tau,\gamma)$ 决定. 因此，对于給定的D和 μ，把 $T_D(t,\mu,\gamma)$ 直接表示为 (3.46) 形式的时間序列，或者用这种或那种方法把它表示为具有 (3.46) 形式的分布的极限分布（在上述的广泛意义上）的时間序列，都不是不适当的尝試.

必須承認，这是一个有待将来来完成的研究，而不应当認为它就已經完成了. 但是，照作者看来，为了合理而无矛盾地处理許多和非綫性預测、非綫性滤波、非綫性情况下信息传递的估价、高密度气体理論和湍流理論等有关的問題，进行这个研究是最有希望的. 上述这些問題也許都是通訊工程中最迫切需要解决的.

我們現在来討論(3.34)形式的时間序列的預测問題. 我們看到，这种时間序列的一个唯一的独立統計参数是 $\Phi(t)$，即 (3.35) 式；这意味和K相关連的唯一有意义的量是

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+t)ds. \tag{3.67}$$

式中K当然取实数値.

我們作富里埃变换

$$K(s) = \int_{-\infty}^{\infty} k(\omega)\, e^{i\omega s}\, d\omega. \tag{3.68}$$

知道 $K(s)$ 后就能知道 $k(\omega)$，反之亦真. 于是，

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} K(s)K(s+\tau)ds = \int_{-\infty}^{\infty} k(\omega)k(-\omega)e^{i\omega\tau}d\omega. \qquad (3.69)$$

因此，关于 $\Phi(\tau)$ 的知識和关于 $k(\omega)k(-\omega)$ 的知識是等价的. 但由于 $K(s)$ 取实数値，我們有

$$K(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{k(\omega)}\, e^{-i\omega s}d\omega, \qquad (3.70)$$

即 $k(\omega) = \overline{k(-\omega)}$. 因此，$|k(\omega)|^2$ 是一已知函数，这意味 $\log(k(\omega))$ 的实数部分是一已知函数. 如果把这实数部分写成

$$F(\omega) = R\{\log(k(\omega))\}, \qquad (3.71)$$

则决定 $K(s)$ 的問題就相当于决定 $\log(k(\omega))$ 的虛数部分的問題. 这个問題的解一般是不定的，除非对 $k(\omega)$ 进一步加以一定限制. 我們考慮如下形式的限制：对于上半平面的 ω 函数 $\log k(\omega)$ 是解析的，而且上升速度足够的小. 为了满足这个限制条件，我們假設 $k(\omega)$ 和 $(k(\omega))^{-1}$ 在整个实数軸上是代数地增长. 这时，$(F(\omega))^2$ 将是一偶函数，而且至多是对数地趋于无限大，并存在歌西主值

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(u)}{u-\omega}du. \qquad (3.72)$$

由(3.72)决定的变换叫做希尔伯特变换，它把 $\cos\lambda\omega$ 变为 $\sin\lambda\omega$，把 $\sin\lambda\omega$ 变为 $-\cos\lambda\omega$. 因此，$F(\omega)+iG(\omega)$ 是一形式为

$$\int_{0}^{\infty} e^{i\lambda\omega}\, d(M(\lambda)) \qquad (3.73)$$

的函数，而且对应的 $\log|k(\omega)|$ 滿足我們对它在下半平面的要求. 令

$$k(\omega) = \exp(F(\omega)+iG(\omega)), \qquad (3.74)$$

我們能証明：在很一般的条件下，函数 $k(\omega)$ 具有使 (3.68) 中定义的 $K(s)$ 对所有負的变数値为零的性質. 因此，

$$f(t,\gamma) = \int_{-t}^{\infty} K(t+\tau)d\xi(\tau,\gamma). \qquad (3.75)$$

另一方面，我們能証明：适当地决定 N_n 后，$1/k(\omega)$ 可以写成如下

形式:

$$\lim_{n\to\infty}\int_0^\infty e^{i\lambda\omega}\,dN_n(\lambda);\tag{3.76}$$

而且,做到这点只需使

$$\xi(\tau,\gamma)=\lim_{n\to\infty}\int_0^\tau ds\int_{-t}^\infty Q_n(t+\sigma)f(\sigma,\gamma)\,d\sigma.\tag{3.77}$$

式中 Q_n 必須具有如下形式上的性質:

$$f(t,\gamma)=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^\infty K(t+\tau)d\tau\int_{-\tau}^\infty Q_n(\tau+\sigma)f(\sigma,\gamma)\,d\sigma.\tag{3.78}$$

一般說,我們有

$$\psi(t)=\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^\infty K(t+\tau)d\tau\int_{-\tau}^\infty Q_n(\tau+\sigma)\psi(\sigma)\,d\sigma,\tag{3.79}$$

或者,如果象(3.68)那样写出

$$K(s)=\int_{-\infty}^\infty k(\omega)\,e^{i\omega s}\,d\omega,$$

$$Q_n(s)=\int_{-\infty}^\infty q_n(\omega)\,e^{i\omega s}\,d\omega,$$

$$\Psi(s)=\int_{-\infty}^\infty \psi(\omega)\,e^{i\omega s}\,d\omega,\tag{3.80}$$

則

$$\Psi(\omega)=\lim_{n\to\infty}(2\pi)^{3/2}\Psi(\omega)q_n(-\omega)k(\omega),\tag{3.81}$$

因此,

$$\lim_{n\to\infty}q_n(-\omega)=\frac{1}{(2\pi)^{3/2}k(\omega)}.\tag{3.82}$$

这个結果对于求得一个在形式上与頻率关联的而不是与时間关联的預測运算子很有用处.

这样, $\xi(t,\gamma)$ 的过去和現在(确切地說,"微分" $d\xi(t,\gamma)$ 的过去和現在)决定 $f(t,\gamma)$ 的过去和現在,反之亦眞.

如果 $A>0$, 則

$$\begin{aligned}f(t+A,\gamma)&=\int_{-t-A}^\infty K(t+A+\tau)\,d\xi(\tau,\gamma)\\&=\int_{-t-A}^{-t}K(t+A+\tau)\,d\xi(\tau,\gamma)+\\&\quad+\int_{-t}^\infty K(t+A+\tau)\,d\xi(\tau,\gamma).\end{aligned}\tag{3.83}$$

这里，最后表示式中的第一项依赖于 $d\xi(\tau,\gamma)$ 的变程，但即使我們知道了 $\sigma \leqslant t$ 的 $f(\sigma, \gamma)$，也不能由此得到有关这变程的任何知識. 第一項与第二項完全无关. 它的均方值为

$$\int_{-t-A}^{-t} [K(t + A + \tau)]^2 \, d\tau = \int_0^A [K(\tau)]^2 \, d\tau, \qquad (3.84)$$

这說明我們有关它的知識都是統計的. 可以証明，均方值 (3.84) 是高斯分布. 它是 $f(t + A,\gamma)$ 的可能的最优預測的誤差.

最优預測本身是(3.83)右端第二項，

$$\int_{-t}^{\infty} K(t + A + \tau) \, d\xi(\tau,\gamma)$$

$$= \lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty} K(t + A + \tau) \, d\tau \int_{-\tau}^{\infty} Q_n(\tau + \sigma) f(\sigma,\gamma) \, d\sigma \qquad (3.85)$$

如果現在令

$$k_A(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\infty} K(t + A) e^{-i\omega t} \, dt, \qquad (3.86)$$

并将运算子(3.85)应用于 $e^{i\omega t}$，則得

$$\lim_{n\to\infty}\int_{-t}^{\infty} K(t + A + \tau) \, d\tau \int_{-\tau}^{\infty} Q_n(\tau + \sigma) e^{i\omega\sigma} \, d\sigma = A(\omega) e^{i\omega t};$$
$$(3.87)$$

这使我們得到(如同(3.81)那样)

$$A(\omega) = \lim_{n\to\infty} (2\pi)^{3/2} q_n(-\omega) k_A(\omega) = k_A(\omega)/k(\omega)$$
$$= \frac{1}{2\pi k(\omega)}\int_A^{\infty} e^{-i\omega(t-A)} \, dt \int_{-\infty}^{\infty} k(u) \, e^{iut} \, du. \qquad (3.88)$$

这就是最优預測运算子的頻率形式表示.

在 (3.34) 那样的时間序列場合，滤波問題与預測問題有非常密切的关系. 設消息加噪声的形式为

$$m(t) + n(t) = \int_0^{\infty} K(\tau) \, d\xi(t - \tau, \gamma); \qquad (3.89)$$

而消息的形式为

$$m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Q(\tau) \, d\xi(t - \tau,\gamma) + \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \, d\xi(t - \tau,\delta), \quad (3.90)$$

式中 γ 和 δ 彼此独立地分布在 $(0,1)$ 上，則由关于 $m(t + a)$ 的过

去和現在的知識得到的 $m(t+a)$ 可預測部分显然为

$$\int_0^\infty Q(\tau+a)d\xi(t-\tau,\gamma), \tag{3.901}$$

而这預測的均方誤差为

$$\int_{-\infty}^a [Q(\tau)]^2 d\tau + \int_{-\infty}^\infty [R(\tau)]^2 d\tau. \tag{3.902}$$

此外,假定我們已知下列諸量:

$$\begin{aligned}
\Phi_{22}(t) &= \int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta n(t+\tau)n(\tau) \\
&= \int_0^\infty [K(|t|+\tau) - Q(|t|+\tau)][K(\tau)]d\tau \\
&= \int_0^\infty [K(|t|+\tau) - Q(|t|+\tau)][K(\tau)-Q(\tau)]d\tau + \\
&+ \int_{-|t|}^0 [K(|t|+\tau) - Q(|t|+\tau)][-Q(\tau)]d\tau + \\
&+ \int_{-\infty}^{-|t|} Q(|t|+\tau)Q(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^\infty R(|t|+\tau)R(\tau)d\tau \\
&= \int_0^\infty K(|t|+\tau)K(\tau)d\tau - \int_{-|t|}^\infty K(|t|+\tau)Q(\tau)d\tau + \\
&+ \int_{-\infty}^\infty Q(|t|+\tau)Q(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^\infty R(|t|+\tau)R(\tau)d\tau,
\end{aligned} \tag{3.903}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_{11}(\tau) &= \int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta m(|t|+\tau)m(\tau) \\
&= \int_{-\infty}^\infty Q(|t|+\tau)Q(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^\infty R(|t|+\tau)R(\tau)d\tau.
\end{aligned} \tag{3.904}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_{12}(\tau) &= \int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta m(t+\tau)n(\tau) \\
&= \int_0^1 d\gamma \int_0^1 d\delta m(t+\tau)(m(\tau)+n(\tau)) - \Phi_{11}(\tau) \\
&= \int_0^1 d\gamma \int_{-t}^\infty K(\sigma+t)\, d\xi(\tau-\sigma,\gamma) \int_{-t}^\infty Q(\tau)d\xi(\tau-\sigma,\gamma) - \\
&- \Phi_{11}(\tau) = \int_{-t}^\infty K(t+\tau)Q(\tau)d\tau - \Phi_{11}(\tau).
\end{aligned} \tag{3.905}$$

$$
\left.\begin{aligned}
\Phi_{22}(\omega) &= |k(\omega)|^2 + |q(\omega)|^2 - q(\omega)\overline{k(\omega)} - k(\omega)\overline{q(\omega)} + |r(\omega)|^2, \\
\Phi_{11}(\omega) &= |q(\omega)|^2 + |r(\omega)|^2, \\
\Phi_{12}(\omega) &= k(\omega)\overline{q(\omega)} - |q(\omega)|^2 - |r(\omega)|^2,
\end{aligned}\right\} \tag{3.906}
$$

式中

$$
\left.\begin{aligned}
k(\omega) &= \frac{1}{2\pi}\int_0^\infty K(s)e^{-i\omega s}\,ds, \\
q(\omega) &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^\infty \overline{Q}(s)e^{-i\omega s}\,ds, \\
r(\omega) &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^\infty R(s)e^{-i\omega s}\,ds.
\end{aligned}\right\} \tag{3.907}
$$

于是我們得到

$$
\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{12}(\omega) + \overline{\Phi_{12}(\omega)} + \overline{\Phi_{22}(\omega)} = |k(\omega)|^2 \tag{3.908}
$$

和

$$
q(\omega)\overline{k(\omega)} = \Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega), \tag{3.909}
$$

这里为对称起見，我們曾把 $\Phi_{21}(\omega)$ 写成了 $\Phi_{21}(\omega)=\overline{\Phi_{12}(\omega)}$. 和我們前面用 (3.74) 来定义 $k(\omega)$ 一样，我們現在能够用(3.908)决定 $k(\omega)$. 这里，以 $\Phi_{11}(t) + \Phi_{22}(t) + 2R\{\Phi_{12}(t)\}$ 作 $\Phi(t)$. 由此得到

$$
q(\omega) = \frac{\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}. \tag{3.910}
$$

因而，

$$
O(t) = \int_{-\infty}^\infty \frac{\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}} e^{i\omega t}\,d\omega; \tag{3.911}
$$

因此，具有最小均方誤差的 $m(t+a)$ 的最优預測为

$$
\int_0^\infty d\xi(t-\tau,\gamma)\int_{-\infty}^\infty \frac{\Phi_{11}(\omega) + \Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}} e^{i\omega(t+a)}\,d\omega. \tag{3.912}
$$

把上式和(3.89)結合起来，并应用类似于用来得到(3.88)的推演，那末，作用于 $m(t) + n(t)$ 上的，使我們能得到 $m(t)$ 的"最优"表示式的运算子，如果用頻率尺度写出将是

$$\frac{1}{2\pi k(\omega)}\int_a^\infty e^{-i\omega(t-a)}\,dt\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\Phi_{11}(u)+\Phi_{21}(u)}{\overline{k(u)}}e^{iut}du. \tag{3.913}$$

这个运算子是电机工程师称为滤波器的特性运算子．量 a 是滤波器的滞后．它可以是正数，也可以是負数；当它为負时，$-a$ 叫作超前．我們总可以以任意高的精确度造出和 (3.913) 相当的装置．但关于制造这种装置的細节，电机工程专家会比本书的讀者更感必要．这些細节可以在任何有关的文献中找到[1]．

滤波的均方差 (3.902) 可以表成具有无限大滞后 ($a=-\infty$) 的滤波的均方差之和：

$$\int_{-\infty}^{\infty}[R(\tau)]^2\,d\tau=\Phi_{11}(0)-\int_{-\infty}^{\infty}[Q(\tau)]^2\,d\tau$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_{11}(\omega)\,d\omega-\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}\right|^2 d\omega$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\Phi_{11}(\omega)-\frac{|\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)|^2}{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{12}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)+\Phi_{22}(\omega)}\right\}d\omega$$

$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\begin{vmatrix}\Phi_{11}(\omega) & \Phi_{12}(\omega)\\ \Phi_{21}(\omega) & \Phi_{22}(\omega)\end{vmatrix}}{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{12}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)+\Phi_{22}(\omega)}d\omega; \tag{3.914}$$

以及和滞后 a 有关的那一部分

$$\int_{-\infty}^{a}[Q(\tau)]^2 dt=\int_{-\infty}^{a}dt\left|\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\Phi_{11}(\omega)+\Phi_{21}(\omega)}{\overline{k(\omega)}}e^{i\omega t}\,d\omega\right|^2 \tag{3.915}$$

之和．我們看到，滤波的均方差是滞后 a 的单調下降函数．

在消息加噪声的場合下，另一个由布朗运动引出的有趣問題是信息传递率的問題．为簡单起見，我們考虑消息和噪声不相关的情形，即

$$\Phi_{12}(\omega)\equiv\Phi_{21}(\omega)\equiv 0. \tag{3.916}$$

在这情形下，我們来考察

1）特别要提到的是最近李郁荣博士的論文。

上述三个量的富里埃变换分别为

$$m(t)=\int_{-\infty}^{\infty}M(\tau)d\xi(t-\tau,\gamma),$$

$$n(t)=\int_{-\infty}^{\infty}N(\tau)d\xi(t-\tau,\delta), \tag{3.917}$$

式中 γ 和 δ 的分布彼此独立. 如果得知$m(t)+n(t)$在区域$(-A, A)$上,试问由此获得多少关于 $m(t)$ 的信息? 注意,我们应当料想到,所求的这个信息量和我们得知

$$\int_{-A}^{A}M(\tau)d\xi(t-\tau,\gamma) \tag{3.918}$$

的所有数值时而获得的关于

$$\int_{-A}^{A}M(\tau)d\xi(t-\tau,\gamma)+\int_{-A}^{A}N(\tau)d\xi(t-\tau,\delta) \tag{3.919}$$

的信息量相差不多,这里 γ 和 δ 的分布也是彼此独立的. 另一方面,可以证明,(3.918)的第 n 个富里埃系数具有和其他一切富里埃系数无关的高斯分布,而且它的均方值正比于

$$\left|\int_{-A}^{A}M(\tau)\exp\left(i\frac{\pi n\tau}{A}\right)d\tau\right|^2. \tag{3.920}$$

因此,由(3.09),关于M的全部信息量为

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{1}{2}\log_2\frac{\left|\int_{-A}^{A}M(\tau)\exp\left(\frac{in\pi\tau}{A}\right)d\tau\right|^2+\left|\int_{-A}^{A}N(\tau)\exp\left(\frac{in\pi\tau}{A}\right)d\tau\right|^2}{\left|\int_{-A}^{A}N(\tau)\exp\left(\frac{in\pi\tau}{A}\right)d\tau\right|^2}, \tag{3.921}$$

而能量传递的时间密度则为这个量用$2A$除. 当 $A\to\infty$ 时,(3.921)趋于

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}du\log_2\frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty}M(\tau)\exp(iu\tau)d\tau\right|^2+\left|\int_{-\infty}^{\infty}N(\tau)\exp(iu\tau)d\tau\right|^2}{\left|\int_{-\infty}^{\infty}N(\tau)\exp(iu\tau)d\tau\right|^2}. \tag{3.922}$$

上述场合下的信息传递率的这个结果,是由作者和申农得到的. 我们看到,它不仅决定于传递消息的有效频带宽度,而且还决定于

噪声的振幅大小. 事实上,它和用来测定每个人的听力和听力损失量的听力损失图有密切关系. 在这种图中,横軸表示頻率数,下边界的纵坐标表示听閾強度的对数——我們把它叫做接收系統内部噪声強度的对数,而上边界的纵坐标則表示系統能接收的最大消息強度的对数. 因此,上下边界間的面积是一个具有(3.922)量綱的量,因而可以取作耳朵能够忍受的信息传递率的測度.

关于和布朗运动有綫性关系的消息理論,具有許多重要的变形. (3.88),(3.914)和(3.922)都是重要的公式;当然,解释这些公式所必需的定义也是重要的. 这个理論目前有如下一系列的变形. 首先,当消息和噪声,是由有布朗运动作用的綫性共振器所产生出来时,由这个理論可以作出預測器和濾波器的最优設計;但在大多数通常情况下,我們只能得到預測器和濾波器的可能設計. 虽然这不能說是絕对最优的設計,但就对于进行綫性操作的装置說,則是使預測和濾波的均方差为最小的設計. 然而,一般說,我們要考虑某些非綫性装置,因为它們工作得比任何綫性装置还要好.

其次,上面考虑的时間序列是簡单时間序列,其中只有一个变量依賴于时間. 还有一种多重时間序列,其中有許多变量同时依賴于时間;这种时間序列在經济学、气象学等部門中是特别重要的. 逐日作出的美国总天气图就是这种时間序列. 对于这样的时間序列,我們必須同时把許多函数展成頻率形式,而象(3.35)和(3.70)后面討論的 $|k(\omega)|^2$ 那样的二次量,則必須用成对量的行列,即用矩陣来代替. 这时,运用使 $k(\omega)$ 在其复平面内满足某些附加条件的方法,由 $|k(\omega)|^2$ 来决定 $k(\omega)$,成为一个十分困难的問題,这特别由于矩陣乘法是一个不可交換运算的原故. 但是,关于多元理論的这个問題已經由克耐因(Krein)和作者解决了,至少部分地解决了.

多元理論是上述一元理論的复杂化. 除此而外,还有一种和一元理論有密切关系的理論,它是一元理論的簡单化. 这就是关于离散时間序列的預測,濾波和信息量的理論. 离散时間序列是

参数为 α 的函数 $f_n(\alpha)$的序列,其中 n 跑过 $-\infty$ 到 ∞ 的一切整数值. 和前面一样,量 α 是分布参数，可以認为它均匀地在 $(0,1)$ 上变动. 如果当 n 变为 $n+\nu$ (ν 取整数) 时，时間序列的統計性質不变,我們就把它叫作处在統計平衡的时間序列.

离散时間序列的理論在許多方面都比連續时間序列理論更簡单. 例如，要做到它由一系列独立选择来决定就比較容易. 每一項(在混合的場合下)都可以表成前面各項与某个和前面各項无关的、均匀分布在$(0,1)$上的量的組合,这些独立量的序列就代替了在連續場合下起十分重要作用的布朗运动的作用.

如果 $f_n(\alpha)$ 是一处在統計平衡的时間序列，而且是度量可迁的,則它的自相关系数是

$$\Phi_m = \int_0^1 f_m(\alpha)\, f_0(\alpha)\, d\alpha, \tag{3.923}$$

并且几乎对所有的 α 我們都有

$$\begin{aligned}\Phi_m &= \lim_{N\to\infty}\frac{1}{N+1}\sum_0^N f_{k+m}(\alpha) f_k(\alpha) \\ &= \lim_{N\to\infty}\frac{1}{N+1}\sum_0^N f_{-k+m}(\alpha) f_{-k}(\alpha).\end{aligned} \tag{3.924}$$

我們令

$$\Phi_n = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\omega) e^{in\omega}\, d\omega \tag{3.925}$$

或

$$\Phi(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} \Phi_n e^{-in\omega}. \tag{3.926}$$

令

$$\frac{1}{2}\log\Phi(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} p_n \cos n\omega, \tag{3.927}$$

再令

$$G(\omega) = \frac{p_0}{2} + \sum_1^{\infty} p_n e^{in\omega}. \tag{3.928}$$

令

$$e^{g(\omega)} = k(\omega), \tag{3.929}$$

則在很一般的条件下，$k(\omega)$ 将是一个在单位圓内无零点或奇点的函数在单位圓上的边界值．这里，ω 表示单位圓上点的偏角．我們将有

$$|k(\omega)|^2 = \Phi(\omega). \tag{3.930}$$

現在，設具有超前 ν 的 $f_n(\alpha)$ 的最优綫性預測为

$$\sum_0^\infty f_{n-\nu}(\alpha)\, W_\nu, \tag{3.931}$$

則得到

$$\sum_0^\infty W_\mu e^{i\mu\omega} = \frac{1}{2\pi k(\omega)} \sum_{\mu=\nu}^\infty e^{i\omega(\mu-\nu)} \int_{-\pi}^{\pi} k(u) e^{-i\mu u}\, du. \tag{3.932}$$

它和(3.88)相当．注意，如果令

$$k_\mu = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} k(u) e^{-i\mu u}\, du, \tag{3.933}$$

則

$$\sum_0^\infty W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\nu\omega} \frac{\sum_\nu^\infty k_\mu e^{i\mu\omega}}{\sum_0^\infty k_\mu e^{i\mu\omega}} = e^{-i\nu\omega}\left(1 - \frac{\sum_0^{\nu-1} k_\mu e^{i\mu\omega}}{\sum_0^\infty k_\mu e^{i\mu\omega}}\right). \tag{3.934}$$

在很一般的場合下，我們能設

$$\frac{1}{k(\omega)} = \sum_0^\infty q_\mu e^{i\mu\omega}, \tag{3.935}$$

这显然是上述作成 $k(\omega)$ 的方法带来的結果．这时，(3.934)变为

$$\sum_0^\infty W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\nu\omega}\left(1 - \sum_0^{\nu-1} k_\mu e^{i\mu\omega} \sum_0^\infty q_\lambda\, e^{i\lambda\omega}\right). \tag{3.936}$$

特别，当 $\nu = 1$ 时，

$$\sum_0^\infty W_\mu e^{i\mu\omega} = e^{-i\omega}\left(1 - k_0 \sum_0^\infty q_\lambda\, e^{i\lambda\omega}\right) \tag{3.937}$$

或

$$W_\mu = -q_{\lambda+1} k_0. \tag{3.938}$$

因此，对于先一步的預測 $f_{n+1}(\alpha)$，其最优值为

$$-k_0 \sum_{0}^{\infty} q_{\lambda+1} f_{n-\lambda}(\alpha); \qquad (3.939)$$

利用逐步預測过程，我們就能解決全部离散时間序列綫性預測的問題．象連續場合中一样，如果

$$f_n(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} K(n-\tau)\, d\xi(\tau, \alpha), \qquad (3.940)$$

我們上面得到的这个預測在所有可能的方法中是最优的預測．

关于把濾波問題由連續場合过渡到离散場合，几乎只要遵循和前面相同的討論．这时，表示最优濾波器頻率特性的(3.913)变为如下形式：

$$\frac{1}{2\pi k(\omega)} \sum_{\nu=a}^{\infty} e^{-i\omega(\nu-a)} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\{\Phi_{11}(u) + \Phi_{21}(u)\} e^{iu\nu}\, du}{\overline{k(u)}}, \qquad (3.941)$$

式中所有項的定义都和連續場合的相同，只是所有对 ω 或 u 的积分限都是从 $-\pi$ 到 π 而不是从 $-\infty$ 到 ∞，对所有 ν 的求和是离散求和，而不是对 t 的积分求和．通常，离散时間序列的濾波器要做成一个用电路在物理上加以实現的裝置，不如統計学家用它作为一种数学程序，从非純粹統計数据求得最优結果那样来得容易．

最后，在有噪声

$$\int_{-\infty}^{\infty} N(n-\tau)\, d\xi(t, \delta) \qquad (3.942)$$

存在的場合下，当 γ 和 δ 的分布彼此独立时，离散时間序列的信息传递率的形式为

$$\int_{-\infty}^{\infty} M(n-\tau)\, d\xi(t, \gamma), \qquad (3.943)$$

它完全与(3.922)相当；即这时的信息传递量为

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} du \log_2 \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty} M(\tau) e^{iu\tau} d\tau\right|^2 + \left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)\, e^{iu\tau}\, d\tau\right|^2}{\left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)\, e^{iu\tau}\, d\tau\right|^2}, \qquad (3.944)$$

式中，在区間$(-\pi, \pi)$上，

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} M(\tau) e^{iu\tau}\, d\tau\right|^2 \qquad (3.945)$$

表示消息的功率按频率的分布，而

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} N(\tau)e^{i\omega\tau}\,d\tau\right|^2 \qquad (3.946)$$

表示噪声功率按频率的分布.

这里发展的統計理論，要求我們对所观测的时間序列的过去具有充分的知識. 但无論在什么場合，我們都不能满足这个要求，因为我們的观测不能追溯到无限的过去. 为了超出这个范围，使我們的理論发展成为一个实用的統計理論，必須推广現有的抽样方法. 作者和其他等人[1]已經开始这方面的研究. 我們发現，或者由于必須使用拜意斯定律（Bayes' Law），或者由于必須使用似然理論（theory of likelihood)[2] 的术語技巧，都給这个研究带来了全部的复杂性，似然理論似乎能避免使用拜意斯定律的必要，但实际上却是把使用这定律的責任推諸实际从事这方面工作的統計学家，或其他最后利用其結果的人. 与此同时，理論統計学家却完全可以理直气壮地指出，他所說的話都是完全严密和无可非議的.

最后，在結束本章时，还应当討論一下現代量子力学. 这个討論說明时間序列理論伸入到近代物理学的最高点. 在牛頓物理学中，物理現象序列完全由它的过去所决定，特別，完全由任一瞬間所有的位置和动量的决定所决定. 在全部吉布斯理論中，这一点仍然是正确的，如果整个宇宙的多重时間序列能完全决定，則任一瞬間的关于所有位置和动量的知識将决定整个未来. 仅仅因为还有一些坐标和动量还不知道，还沒有观察到，我們实际研究的时間序列才具有一种混合的性質，对这种性質，我們在本章的由布朗运动得到的时間序列中已經很熟悉了. 海森堡对物理学的巨大貢

---

1) Wiener, N. 和 Doob 的著作，即将由紐約的 John Wiley 公司出版*.

2) 見 J. von Neumann 与 R. A. Fisher 的著作.

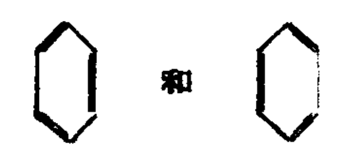
* 虽然維納写成本书已将十年，这里的脚註和序中所提到的那种合写的著作并沒有出版(这是維納到日本来的时候弄明白的). 但是 Doob 个人著的下面一本书却出版了.

Doob, J. L., "Stochastic Processes", John, Wiley, 1952.

这本书的最后一章講的是預测理論. ——日譯者注.

献就在于，他用另一种世界来代替上述吉布斯的仍然是准牛顿式的世界，对于这另种世界，时間序列无法归結为一个在时間进展中具有决定論发展綫索的系綜。在量子力学中，单个系統的全部过去并不以絕对的方式决定其未来，而仅决定該系統未来可能状态的分布。古典物理为了获得系統整个过程的知識所必需的那些量，只能不精确地近似地而不能同时精确地加以观測。但是，在古典物理要求的精确度范围內（已經証明这个范围在实驗上是可以适用的），这样的近似观測还是足够精确的。观測动量及其共轭位置的条件是互不相容的。为了尽可能精确地观測系統的位置，我們必須借助光或电子波或其他类似的具有高分辨本領的短波长的方法来进行观測。但是，光具有仅仅和它的频率有关的粒子性，用高频光照射物質，意味着使它的动量发生随频率增加而增大的动量变化。另一方面，低频光可以使被照射粒子的动量变化小，但它沒有能明晰指示粒子位置的足够的分辨本領。中間频率的光对位置和动量二者提供的都是模糊的估計。一般說，沒有任何一組可以設想的观測，它能提供我們关于系統的过去的足够信息，而这些信息能提供我們关于系統的未来的完全信息。

虽然如此，如同在一切时間序列系綜的場合中一样，我們这里发展的信息量理論对于量子力学也能适用，因而关于熵的理論也能适用。但由于我們目前处理的时間序列是混合性的（即使在数据尽可能的完全时也是如此），我們发現我們的系統并沒有絕对势垒；在时間的过程中，系統的任一状态都能而且一定会变化到另一状态。但是，发生这种变化的几率归根到底决定于两个状态的相对几率或測度。对于那些能通过多次变化而变化为自身的状态来說，这种状态变化的几率特別高，用量子理論家的話說，也就是对于那些具有高內部共振或高量子簡併性的状态，这些状态的变化几率特別高。苯环就是一个这样的例子，因为它有两个等价的状态：



这可以使我們想象：一个系統的各个构成部分可以按不同的方式相互紧密地結合起来，許多氨基酸的混合物結合为各种蛋白質鏈就是这种情形，至于有許多鏈是相同鏈的情况，則当它們进入彼此密切締合的阶段时，它們的情况要比具有不同鏈的情况更为稳定。海登（Haldane）曾尝試提出，这可能就是基因和病毒自身繁殖的途径；虽然他沒有把这个提議作为最后結論那样地肯定下来，但我想，我們沒有什么理由不把它作为正式的假說而加以保留。如海登本人所指出的，由于量子理論中任何单个粒子都沒有明晰的个体性，所以对于由一个基因以这种方式繁殖成两个基因的情形，我們不可能很准确地說这两个基因样品中，那一个是主型，那一个是模型。

我們知道，这种同样性質的共振現象在生命体中是經常出現的。生特-乔治（Szent-Györge）曾指出这种現象在肌肉結构中的重要性。高共振物質十分普遍地都有一种非常的儲藏能量和信息的能力，这样的儲藏在肌肉收縮时肯定是发生的。

再有，和生殖有关的同样現象，也許可以用不同种的生命体中化学物質不寻常的特殊性，甚至用同种个体間化学物質不寻常的特殊性来加以解释。这种考虑可能在免疫学中非常重要。

第四章

反馈和振荡

一个病人到神經病院来临診，他幷沒有瘫痪，当他接到命令时还能移动下肢．然而，他苦于严重的病废，他在步行时呈現特殊的不准确的步态，两眼朝下，看着地面和足部．他每走一步腿都抬得很高，而且迈足过度，上身則落在后面，如果遮住他的两眼，他就要站立不住而踉蹌倒地，这是怎么回事呢？

另一个病人也来临診，当他安靜地坐在椅中时，好象沒有什么毛病．但是，如果給他一支香烟，在他企图接取这支烟时，他的手会摇摆不定而抓不到它．接着他的手又在另一側作同样无益的摇摆，随后，第三次又摇摆回来，他的手一直就这样进行着无益而激烈的振盪．如果給他一杯水，当他把这杯水端到口边以前就会由于这些摇摆而泼空了．这又是怎么回事呢？

这两个病人都是苦于这种或那种形式的所謂运动失調．他們的肌肉是強壮的，而且很健康，但是不能調节自己的动作．第一个病人患的是脊髓痨．由于梅毒后遺症，他的通常用来传导各种感覚的脊髓后索等部位，遭到了損伤或破坏．他对外来消息的应答变得迟鈍了，即使这些消息不是完全不起作用．他的关节、腱、肌肉和足底中的各个感受器，这些通常报告他下肢运动的位置和状态的器官，不能向中枢神經系統传送什么消息了，他对于有关其姿势的信息，不得不依靠两眼和內耳平衡器官．用生理学家的术語說，他丧失了本体感覚或运动神經感覚的重要部分．

第二个病人幷沒有丧失本体感覚．他受伤的部位是另外一个地方——小脑．他患的病叫小脑性震顫或目的性震顫．看来，小

脑可能具有一种調节肌肉对本体感覚輸入应答的机能，这种調节机能一旦发生障碍，其結果之一就是震顫.

由此可見，为了能对外界产生有效的动作，重要的不仅是我們必須具有良好的效应器，而且必須把效应器的动作情况恰当地回报給中枢神經系統而这些报告的內容必須适当地和其他来自感官的信息組合起来，以便对效应器产生一个适当的調节輸出.有些机械系統的情形与此十分相似.例如，試我們来考虑鉄路上信号塔的情形.信号手控制着一組槓杆，它們能使信号机开发信号或停发信号，并調整轉轍装置.可是，信号手不能盲目訊为信号机和轉轍器是服从他的命令的，說不定轉轍器被牢牢冻住了，或者由于雪的負重使信号机臂弯曲了，这时，轉轍器和信号机——信号手的效应器——的实际状态并不和他发出的命令相适应.为了避免这个偶发事件中所蘊藏的危险，每一个效应器，即轉轍器或信号机，都必須附装一个向信号塔回报的自动回报器，把这些效应器的实际状态和动作情况报告給信号手.这和海軍中的复述命令是机械地相当的：按照慣例，下級在接受命令时必須把命令对上級复述一遍，說明他已經听到了并了解了它.信号手就必須根据这种复述的命令动作.

我們注意，在上述系統中，信息传递和返回的过程（今后我們把它叫作反饋过程）是有人参与的.当然，信号手也不能完全自由行动；轉轍器和信号机相互連結着，这种連結可以是机械的也可以是电的；此外，信号手沒有选择某种危险組合的自由.但是，也有一些反饋过程沒有人的因素参与.用来調节室溫的普通恆溫器，其調节过程就是这样一种反饋过程.有一种能使室溫达到預定溫度指标的装置；如果室內实际溫度低于这个指标，恆溫器就开动起来，使风門打开或使柴油的流量增加，把室溫提高到預定的指标.反之，如果室溫超过預定的指标，风門就关上，或者柴油的流量減少或中断.这样，室溫将近似地保持在固定指标附近.要注意，这指标保持稳定的程度与恆溫器設計的好坏有关，一个設計得不好的恆溫器会使室溫发生剧烈的震盪，如同患了小脑性震顫的人的运动一样.

另一个純机械反饋系統的例子是蒸气机的調速器，它能調节蒸气机在負荷条件有改变时的速度，这种装置最初是由麦克士威尔加以研究的．在瓦特設計的原始形式的調速器中，包括两个連結在两根擺桿上的球，它們可以在旋轉軸的两側擺动．由于球本身的重量或由于弹簧力，这两个球有往下擺的趋势；而由于和轉軸角速度有关的离心作用，它們要往上擺．因此，我們可以假定它們有一个平衡位置，这个位置也和角速度有关．球的位置的改变，經过另外的一些連接桿传递到轉軸上的一个套筒，套筒位置的改变能使一个机件按照如下的方式动作：当蒸气机速度降低而球下落时，它就打开气缸入口处的活閥；当蒸气机的速度增加而球上升时，活閥就关上．我們注意，这个反饋傾向于反抗系統正在进行的动作，因此是負反饋．

我們已經有了稳定温度的負反饋例子，也有了稳定速度的負反饋例子．此外还有稳定位置的負反饋，例如船舶上操舵机的情形．由于舵輪的位置和舵的位置之間有一角度差，操舵机的动作总是要使舵的位置和舵輪的位置一致起来．随意动作中的反饋就是这种性質的反饋．当我們进行随意动作时，我們沒有使某些肌肉运动的明确意图．为了完成特定的动作，譬如說当我們要接取一支香烟的时候，我們并不特别命令某一些肌肉来运动．而且实际上，我們一般也不知道要經过哪些肌肉的运动才能完成那个特定的动作．我們是根据某种表示动作尙未完成的量的大小来調节我們的动作的．

反饋到控制中心的信息，具有反抗被控制的量偏离控制指标的趋势，但是，这种反抗趋势可以按照不同方式依賴于偏离的大小．最簡单的控制系統是綫性控制系統，在这种控制系統中，效应器的輸出和輸入呈綫性关系，当輸入增加时，輸出也成比例地增加．輸出的讀数用某种綫性的装置来記录．这个讀数簡单地就是輸入讀数的分数．我們将在下面建立一个严格的理論，来描述这种装置的运轉情形，特别是，来描述它的反常行为和在过載时发生振盪的情形．

在本书中，我們尽量避免去运用許多数学符号和数学技巧，但在个别地方还不免要运用到，特别在上一章．同样，在这一章的以后部分中，对我們要严格处理的那些材料說，数学符号則是合适的語言；否則就要用囉嗦的长篇大論来代替，这对于外行的人不見得更容易理解，只有对熟悉数学符号的讀者才容易理解，因为他能把它們翻譯成数学符号．当然，最好的折衷办法就是使用数学符号再加以充分的口头說明．

令 $f(t)$ 是一个时間 t 的函数，t 从負无穷跑到无穷．这就是說，$f(t)$是一个对每一时刻 t 都有数值的量．在任一时刻 t，当 s 小于或等于 t 时，$f(s)$的值是可以求得的，但当 s 大于 t 时則不能求得．有些电的和机械的装置，其輸出延迟一固定时間，就是說，对于輸入 $f(t)$，我們得到的輸出是 $f(t-\tau)$，这里 τ 是固定的延迟时間．

我們可以用几部这样的装置組合起来，得到輸出 $f(t-\tau_1)$，$f(t-\tau_2)$，$\cdots$，$f(t-\tau_n)$．对其中每个輸出，我們都能乘上一个固定的正的或負的量．例如，我們可以用分压器使电压乘上一个小于 1 的固定正数，我們也不难設計一种自动平衡装置和放大器，使电压乘上一个負的或大于 1 的量．我們同样不难設計一种簡单的电路，把各个电压連續相加起来，借助于这些，我們可以得到輸出

$$\sum_{1}^{n} a_k f(t-\tau_k). \tag{4.01}$$

随着延迟 τ_k 的数目的增加，并适当选择系数 a_k，这个輸出可以无限接近于下列形式的輸出

$$\int_0^\infty a(\tau) f(t-\tau) d\tau. \tag{4.02}$$

在这个表示式中，应当注意积分限是从 0 到 ∞ 而不是从 $-\infty$ 到∞，这一点很重要．否則，我們就能用各种实际装置进行操作而得到 $f(t+\sigma)$，这里 σ 是正数．但这就涉及到关于 $f(t)$ 的未来的知識；$f(t)$就可以是一个不由它的过去所决定的量，正象一架电車的坐标（由于轉轍器可以使这条或那条軌道开断），不由他的过去所决定一样．当一个物理过程看来象运算子

$$\int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) f(t-\tau) d\tau \tag{4.03}$$

时，式中 $a(\tau)$ 对 τ 的负值不全为零，这意味对 $f(t)$ 不再有一个真正的唯一依赖于它的过去的运算子．有一些物理现象就是这种情形．例如，一个没有输入的动力学系统可能产生振幅不定的永久性振荡，甚至这个振荡的振幅可以增加到无限大．在这情形下，系统的未来不依赖于它的过去，而且，形式上我们可以求出一个依赖于系统的未来的运算子表示式．

从 $f(t)$ 得到(4.02)的运算，具有两个重要的性质：(1)它与时间原点的推移无关；(2)它是线性的．第一个性质可表述为：若

$$g(t) = \int_{0}^{\infty} a(\tau) f(t-\tau) d\tau, \tag{4.04}$$

则有

$$g(t+\sigma) = \int_{0}^{\infty} a(\tau) f(t+\sigma-\tau) d\tau. \tag{4.05}$$

第二个性质可表述为：若

$$g(t) = Af_1(t) + Bf_2(t), \tag{4.06}$$

则有

$$\int_{0}^{\infty} a(\tau) g(t-\tau) d\tau = A\int_{0}^{\infty} a(\tau) f_1(t-\tau) d\tau + B\int_{0}^{\infty} a(\tau) f_2(t-\tau) d\tau. \tag{4.07}$$

可以证明：在适当意义上说，每个作用于 $f(t)$ 的过去的运算子，如果它是线性的而且在时间原点推移下不变，它就具有(4.02)的形式，或者是这种形式的运算子的一个序列的极限．例如，一个具有这些性质的运算子运算于 $f(t)$ 的结果为 $f'(t)$，而

$$f'(t) = \lim_{\varepsilon \to 0} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\varepsilon^2} a\left(\frac{\tau}{\varepsilon}\right) f(t-\tau) d\tau, \tag{4.08}$$

式中

$$a(X) = \begin{cases} 1 (0 \leqslant X < 1); \\ -1 (1 \leqslant X < 2); \\ 0 (2 \leqslant X). \end{cases} \tag{4.09}$$

如我們在前面所看出的，由函数 e^{Zt} 組成的函数 $f(t)$的集合，对于运算子(4.02)說来是特別重要的，因为

$$e^{Z(t-\tau)} = e^{Zt} \cdot e^{-Z\tau}, \tag{4.10}$$

那么延迟运算子就变成一个仅仅依賴于 Z 的乘子，于是，(4.02) 变为

$$e^{Zt}\int_0^\infty a(\tau)e^{-Z\tau}d\tau, \tag{4.11}$$

它也是一个仅仅依賴于 Z 的倍加运算子. 表示式

$$\int_0^\infty a(\tau)e^{-Z\tau}d\tau = A(Z) \tag{4.12}$$

叫作运算子 (4.02) 的**頻率函数表示式**. 如果取 Z 为复数 $x+iy$，这里 x 和 y 都是实数，則这个表示式变为

$$\int_0^\infty a(\tau)e^{-x\tau}e^{-iy\tau}d\tau, \tag{4.13}$$

因此，由著名的西瓦尔(Schwarz)积分不等式，若 $y>0$，且

$$\int_0^\infty |a(\tau)|^2 d\tau < \infty, \tag{4.14}$$

我們就有

$$\begin{aligned} |A(x+iy)| &\leqslant \left\{\int_0^\infty |a(\tau)|^2 d\tau \int_0^\infty e^{-2x\tau}d\tau\right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \left\{\frac{1}{2x}\int_0^\infty |a(\tau)|^2 d\tau\right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \tag{4.15}$$

这就是說，$A(x+iy)$ 是每个半平面 $x \geqslant \varepsilon > 0$ 上复变数 $x+iy$ 的有界全純函数，而 $A(iy)$ 在某种确定意义上則表示这个函数的边界值.

令

$$u + iv = A(x+iy), \tag{4.16}$$

式中 u 和 v 是实数. 这时，$x+iy$ 将作为 $u+iv$ 的函数而被决定(不一定是单值的). 除了与使 $\dfrac{\partial A(Z)}{\partial Z}=0$ 的点 $z=x+iy$ 相对应的那些点 $u+iv$ 外，这个函数是解析函数，但是半純的. 边界

$x=0$ 是一曲綫,其参数方程为

$$u+iv=A(iy) \quad (y\text{ 为实数}). \tag{4.17}$$

这个曲綫自身可以相交任意多次. 但一般説它使平面分为两个区域. 让我們从 y 由 $-\infty$ 逐渐跑到 ∞ 的方向来考虑曲綫(4.17)的情形. 这时,如果我們越出曲綫(4.17),沿着一不再与(4.17)相交的連續曲綫向右前进,我們就得到一个点集. 不属于这个点集也不在(4.17)上的点,叫作外点,曲綫(4.17)中包括外点的极限点的那一部分,叫作有效边界. 所有其它的点都叫作內点. 例如,在下一图中,箭头所画的表示边界,阴影区域是內点,有效边界用粗綫表示.

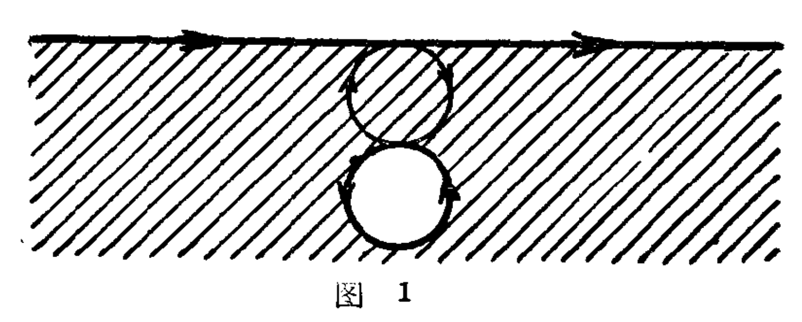


图 1

因此,A 在任意一个右半平面內有界的条件,将是无穷远点不能为內点. 它可以是边界点,但是对于这种边界点的类型必須加以十分严格的限制. 这些限制和內点集离无穷远点的"厚度"[1]有关.

現在,我們来研究綫性反饋的数学表示問題. 假定系統控制过程的示意图(不是綫路图)如图 2:

这里,馬达运算器的輸入为 Y,它是初始輸入 X 与乘法运算器輸出之差,乘法器对馬达动力輸出的倍加因子为 λ. 即

$$Y=X-\lambda AY \tag{4.18}$$

或

$$Y=\frac{X}{1+\lambda A}\ ; \tag{4.19}$$

1) 厚度——設 ε 为正,令 $z=x+iy$ 平面中 $x\geqslant\varepsilon$ 的部分的 $A(x+iy)$ 向 $u+iv$ 平面的映象 (mapping) 为 $\mathfrak{A}(\varepsilon)$,則 $A(x+iy)$ 因 $x\geqq\varepsilon>0$ 而成为有界的集合,而且如果 $\varepsilon>\varepsilon'$,則 $\mathfrak{A}(\varepsilon')$ 含有 $\mathfrak{A}(\varepsilon)$. 內点集合是 $\varepsilon\longrightarrow0$ 时 $\mathfrak{A}(\varepsilon)$ 的极限集合. 称无限远点在一切 $\mathfrak{A}(\varepsilon)$ 之外为"厚度".——日譯者注.

因而馬达的輸出为

$$AY = \frac{Ax}{1 + \lambda A}. \tag{4.20}$$

因此，相应于整个反饋机构的运算子为 $A/(1+\lambda A)$. 这个运算子当且仅当 $A = -1/\lambda$ 时才等于无穷大. 对于这新的运算子，(4.17) 为

$$u + iv = \frac{A(iy)}{1 + \lambda A(iy)}; \tag{4.21}$$

当且仅当 $-\frac{1}{\lambda}$ 是 (4.17) 的内点时，无穷远点才是内点.

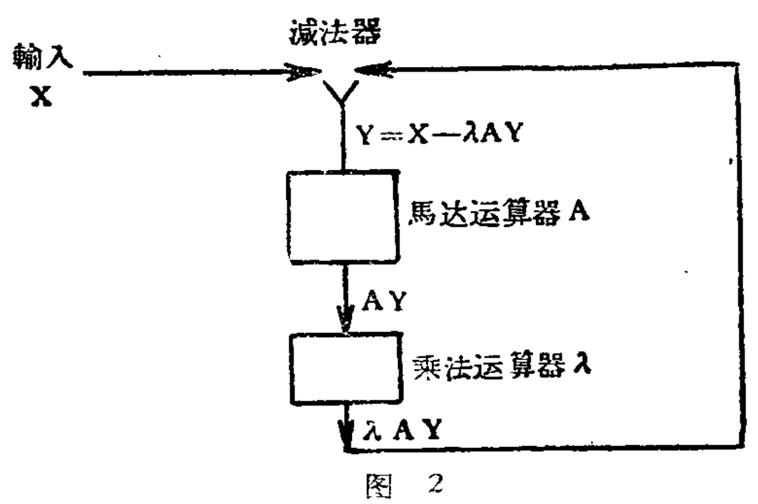


图 2

如果 $-\frac{1}{\lambda}$ 是内点，一个倍加因子为 λ 的反饋一定会引起許多麻煩，事实上，这些麻煩就是系統这时要陷于无終止的愈来愈強的振盪. 反之，如果 $-\frac{1}{\lambda}$ 是外点，我們可以証明这个困难不会发生，这时反饋是稳定的. 如果点 $-\frac{1}{\lambda}$ 在有效边界上，就需要比較复杂的討論. 在大多数場合，系統都会发生振幅并不增大的振盪.

考虑几个运算子 A 的例子和它們許可的反饋范围，也許是值得做的一件事，我們不仅要考虑(4.02)形式的运算子，而且也要考虑它們的极限，假如以上的論証同样可以适用于它們的話.

如果取运算子 A 为微分运算子 $A(z) = z$，則当 y 从 $-\infty$ 到 ∞ 时，$A(z)$ 同样从 $-i\infty$ 到 $i\infty$，内点是右半平面的内点. $-\frac{1}{\lambda}$ 永

远是外点，所以任意等級的反饋都是可能的. 若取运算子为

$$A(z)=\frac{1}{1+kz}, \tag{4.22}$$

則曲綫(4.17)为

$$u+iv=\frac{1}{1+kiy}, \tag{4.23}$$

或

$$u=\frac{1}{1+k^2y^2}; \qquad v=\frac{-ky}{1+k^2y^2}, \tag{4.24}$$

它可以写成

$$u^2+v^2=u. \tag{4.25}$$

这是一个半径为 1/2，中心在(1/2,0)的圓. 它的旋轉方向是順时針方向，內点是通常認为內点的那些点. 在这情形下，当$-\frac{1}{\lambda}$永远在圓外时，許可的反饋范围也是沒有限制的. 与这运算子对应的$a(\tau)$为

$$a(\tau)=\frac{e^{-\tau/k}}{k}. \tag{4.26}$$

又、假設

$$A(z)=\left(\frac{1}{1+kz}\right)^2. \tag{4.27}$$

于是(4.17)为

$$u+iv=\left(\frac{1}{1+kiy}\right)^2=\frac{(1-kiy)^2}{(1+k^2y^2)^2}; \tag{4.28}$$

即

$$u=\frac{1-k^2y^2}{(1+k^2y^2)^2}; \qquad v=\frac{-2ky}{(1+k^2y^2)^2}. \tag{4.29}$$

我們得到

$$u^2+v^2=\frac{1}{(1+k^2y^2)^2}, \tag{4.30}$$

或

$$y=\frac{-v}{(u^2+v^2)2k}. \tag{4.31}$$

于是

$$u=(u^2+v^2)\left(1-\frac{k^2v^2}{4k^2(u^2+v^2)^2}\right)=$$

$$= (u^2 + v^2) - \frac{v^2}{4(u^2 + v^2)}. \tag{4.32}$$

在极坐标中，$u = \rho\cos\varphi, v = \rho\sin\varphi$，上式变为

$$\rho\cos\varphi = \rho^2 - \frac{\sin^2\varphi}{4} = \rho^2 - \frac{1}{4} + \frac{\cos^2\varphi}{4}, \tag{4.33}$$

或

$$\rho - \frac{\cos\varphi}{2} = \pm\frac{1}{2}, \tag{4.34}$$

即

$$\rho^{\frac{1}{2}} = -\sin\varphi/2; \quad \rho^{\frac{1}{2}} = \cos\varphi/2. \tag{4.35}$$

能够証明，这两个方程仅仅表示一条曲綫，它是頂点为原点而歧点在右边的心脏綫．这个曲綫的内点不包含負实軸上的点；和上面情形一样，許可的放大率也是沒有限制的．这时运算子 $a(\tau)$为

$$a(\tau) = \frac{\tau}{k^2}e^{-\tau/k}. \tag{4.36}$$

假設

$$A(z) = \left(\frac{1}{1 + kz}\right)^3. \tag{4.37}$$

并假設 ρ 和 φ 的定义和上一情形中的一样．于是，

$$\rho^{\frac{1}{3}}\cos\frac{\varphi}{3} + i\rho^{\frac{1}{3}}\sin\frac{\varphi}{3} = \frac{1}{1 + kiy}. \tag{4.38}$$

和第一个例子中一样，我們可推得

$$\rho^{\frac{2}{3}}\cos^2\frac{\varphi}{3} + \rho^{\frac{2}{3}}\sin^2\frac{\varphi}{3} = \rho^{\frac{1}{3}}\cos\frac{\varphi}{3}. \tag{4.39}$$

即

$$\rho^{\frac{1}{3}} = \cos\frac{\varphi}{3}, \tag{4.40}$$

它是如下形状的曲綫（見图 3）．阴影区域表示内点区域．所有系数超过 8 [1] 的反饋都是不可能的．相应的 $a(\tau)$为

$$a(\tau) = \frac{\tau^2}{2k^3}e^{-\tau/k}. \tag{4.41}$$

---

1) 当 $\varphi = \pi$ 时，$\rho = \left(\cos\frac{\pi}{3}\right)^3 = 1/8$．因此反饋系数 $\lambda > 8$ 时，反饋是不可能的．

——汉譯者注．

最后，假設运算子A是一个簡单的延迟T单位时間的运算子，即

$$A(z) = e^{-Tz}. \tag{4.42}$$

我們得到

$$u + iv = e^{-Tiy} = \cos Ty - i \sin Ty. \tag{4.43}$$

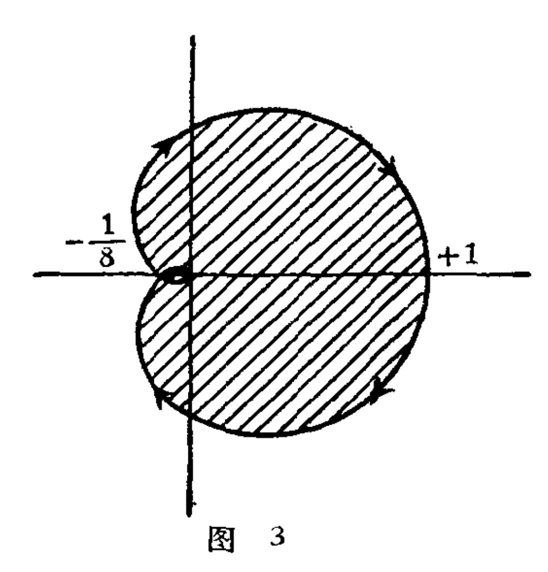


图 3

曲綫(4.17)是以单位速度和順时針方向繞原点旋轉的单位圓．这个曲綫的內部是通常意义下的內部，反饋的极限強度为1．

由此可以作出一个很重要的結論：用任意強度的反饋来补偿运算子 $1/(1 + kz)$ 都是可能的，对于任意寬的頻带，它都可以使 $A/(1 + \lambda A)$无限接近于1．因此，用三次，甚至只用两次的逐次反饋就可以补偿三个这种逐次作用的运算子．但是，我們不可能用单次反饋来无限补偿运算子$1/(1 + kz)^3$，因为这个运算子是三个运算子$1/(1 + kz)$級联起来的合成結果．运算子$1/(1 + kz)^3$也可以写成

$$\frac{1}{2k^2} \frac{d^2}{dz^2} \frac{1}{1 + kz}; \tag{4.44}$$

可以把它看成三个具有一次式分母的运算子的加法合成的极限．因此，它是这样三个不同运算子的和，其中每一个都可以用单次反饋来任意补偿，但它們的和却不能用单次反饋来补偿．

在麦考尔的重要著作中，我們可以看到复杂系統的例子，它能够用两次反饋来稳定，但不能用一次反饋来稳定．使用迴轉罗盘

駕駛船舶时就遇到这种情形．舵手預定的航向和罗盘仪上指示的航向之間的角度，本身表現为舵的轉动．这个轉动在船前进方向上产生一个轉矩以改变船的航向，使得預定航向和实际航向間的差异減小．如果这个过程的完成，是由于直接打开某一舵机的活閥并关上另一舵机的活閥而使舵的轉动速度和船的偏航度成比例的話，那末，舵的角位置就大致和船的轉矩成比例．也就是和它的角加速度成比例．因此，船轉动的大小和偏航度的三次微商的負値成比例，而我們必須依靠迴轉罗盘的反饋来稳定的操作是 kz^3，这里 k 是正的．这时曲綫(4.17)为

$$u + iv = -kiy^3, \tag{4.45}$$

因为左半平面是內点区域，所以用任何伺服机构都不可能稳定这个系統．

在以上的考虑中，我們对駕駛的問題有点过于簡单化了．实际上是有一定摩擦力存在的，船的加速度不仅仅由使船轉动的力决定．因此，如果 θ 是船的角位置而 φ 是舵相对于船的角位置，我們有

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = c_1\varphi - c_2\frac{d\theta}{dt} \tag{4.46}$$

和

$$u + iv = -k_1iy^3 - k_2y^2. \tag{4.47}$$

这个曲綫可以写成

$$v^2 = -k_3u^3, \tag{4.48}$$

它仍然不能用任何反饋来稳定．当 y 从 $-\infty$ 跑到 ∞ 时，u 从 ∞ 跑到 $-\infty$，曲綫的左側是內部．

但是，如果舵的位置和偏航度成比例，那么用反饋来稳定的运算子为 $k_1z^2 + k_2z$，而(4.17)变为

$$u + iv = -k_1y^2 + k_2iy. \tag{4.49}$$

这个曲綫可以写成

$$v^2 = -k_3u, \tag{4.50}$$

但在这場合下，当 y 从 $-\infty$ 跑到 ∞ 时，v 也从 $-\infty$ 跑到 ∞，曲綫的

图形是从 $y=-\infty$ 到 $y=\infty$ 来描画的. 这时曲綫的左側是外部, 因此无限大的放大率都是可能的.

为了达到这个目的, 我們可以使用更高級的反饋. 如果我們不是用实际航向与預定航向間的偏离, 而是用这个量与舵角位置間的差别来調节舵机活閥位置的話, 舵的角位置就非常精确地和船的偏航度成比例, 不过需要足够強度的反饋——即需要将活閥打开得足够寬. 这种双重的反饋控制系統, 事实上就是我們用迴轉罗盘自动駕駛船舶时通常采用的.

在人的躯体中, 手的运动或手指的运动都是一个包括很多关节的系統的运动. 整个輸出是所有这些关节的輸出的矢量和. 我們前面看到, 一般說, 象这种复杂的加法系統不能用单次的反饋来稳定. 因此, 通过对于表示运动尙未完成的量的观察来調节一个动作的随意反饋, 还需要其它形式的反饋来帮助. 我們把这些反饋叫作姿势反饋(postural feed-back), 它們和肌肉系統紧张力的一般維持有关. 随意反饋在小脑受伤的場合具有衰退或紊乱的傾向. 这时如果病人不企图完成一个随意动作, 就不会出現震顫. 如果病人不能够做到端起一杯水而不傾复它, 这是目的振顫, 它的性質和巴金森震顫 (tremor of Parkinsonianism) 或震顫麻痺有本質的不同. 最典型的巴金森震顫往往出現在病人休息的时候, 而当他試图完成一个特定动作时, 看起来却常常是很鎮靜的. 有一些患有巴金森症候的外科医生动起手术来却很胜任. 我們已經知道, 巴金森症候的出現不是根源于小脑疾病, 而是由于脑干中的某些部位有了病理上的病变. 这仅仅是一种姿势反饋疾病的原因, 还有許多姿势反饋疾病则是根源于神經系統其他部位的病变. 生理控制学的重大任务之一, 就是要分解出随意反饋和姿势反饋的复合体的各个不同部分. 搔反射和步行反射就是这种組分反射 (component reflex)的例子.

当反饋可能而且稳定的时候, 如我們已經提到的, 它的优点是使运轉不受負載的影响. 假設負載使特性 A 改变 dA, 則改变率为 dA/A. 如果反饋后的运算子为

$$B=\frac{A}{C+A}, \tag{4.51}$$

我們就有

$$\frac{dB}{B}=\frac{-d\left(1+\frac{C}{A}\right)}{1+\frac{C}{A}}=\frac{\frac{C}{A^2}dA}{1+\frac{C}{A}}=\frac{dA}{A}\frac{C}{A+C}. \tag{4.52}$$

因此，反饋使得系統与馬达特性的依賴关系減小，而且使系統稳定，因为对所有的頻率我們都有

$$\left|\frac{A+C}{C}\right|>1. \tag{4.53}$$

这就是說，內点和外点間的全部边界都必須处在圓心为$-C$，半径为C的圓以內．然而，这即使在我們前面討論过的第一个例子中也不是如此．如果一个強負反饋一直是稳定，他的作用就在于能使系統的低頻稳定度增加，但是一般要以犧牲系統的一定高頻稳定度为代价．在許多場合下，即使是这种有代价的稳定程度也是好的．

由于过量反饋引起振盪而发生的一个很重要的問題，就是初期振盪的頻率問題．这个頻率由iy中的y值决定，iy对应于处在負u軸最左端的(4.17)的內区域和外区域的边界上的点．量y当然是一个具有頻率性質的量．

我們現在要結束从反饋的观点来研究綫性振盪的基本討論了．綫性振盪系統具有若干很特殊的性質，使得它的振盪具有若干特征．其中一个特征是，当系統在振盪时，它总能够(如果沒有其他同时的独立振盪)而且一般說一定是按下一形式振盪：

$$A\sin(Bt+C)e^{Dt}. \tag{4.54}$$

週期性非正弦振盪的存在，常常表明至少对于我們所观察的变量說来系統是非綫性系統的．在某些場合，选择新的独立变量后可以使系統再成为綫性的，不过这种場合很少．

綫性振盪和非綫性振盪另一个很重要的区別是：对于前者，振盪的振幅与頻率完全无关；而对于后者，对应于給定的振盪頻率，系

統的振盪一般只有一个振幅，或者至多只有一組离散的振幅，同时系統也只能有一組离散的振盪頻率．我們考察一下风琴管的情形就可以很好地說明这一点．风琴管的理論有两种：比較粗糙的綫性理論和比較精确的非綫性理論．第一种理論把风琴管当作一个保守系統来处理，不考虑风琴管是如何发生振盪的，并且認为振盪的振幅完全不确定．第二种理論把风琴管的振盪看成能量逸散的过程，并認为这能量来自通过管口的空气流．理論上，的确存在通过管口的稳定状态的空气流，它不和风琴管的任何其他形式的振盪交换能量；但是，对于空气流的某些速度，这个稳定状态的条件是不稳定的．这时，只要偶尔稍为离开这个条件，就会引起能量从空气流輸入到风琴管的某一种或多种本征綫性振盪中；当能量輸入到达一定程度时，就将使管的固有振盪与能量輸入的耦合加強．单位时間的能量輸入和由于热逸散产生的能量輸出，虽然具有不同的增长規律，但达到振盪的稳定状态时，这两个量必須相同．因此，非綫性振盪的振幅和它的頻率一样，也就这样被确定了．

我們上面考查的情形，是一种叫作张弛振盪的例子．在张弛振盪的場合，系統的方程組对时間原点的推移不变，它的解对时間是週期性的（或是对于推广了的周期性概念而言是周期性的），它的振幅和頻率是一定的，但周相則不固定．在我們討論过的情形中，系統的振盪頻率接近于系統的某一疎耦合的，近似于綫性的部分的頻率．梵•德•波尔（B. Van der Pol）是研究张弛振盪的主要权威之一，他曾經指出，上述情形并不經常发生，事实上有些张弛振盪的主頻率并不接近于系統的任何綫性振盪部分的頻率．举一个例子：一股煤气流进一通空气的室，在室中燃一指示灯；当空气中煤气浓度到达某一临界值时，在指示灯点火下，这个系統就要爆炸，发生爆炸的时間仅决定于煤气的流率、空气滲进和燃烧产物滲出的速率，以及煤气和空气这爆炸混合物的成份百分比．

一般說，非綫性方程組很难求解．但是有一种特别容易处理的情形，在这情形下，系統和綫性系統只有很小的差别，方程組中非綫性的項改变得很慢，以致在一个振盪周期中事实上可以看成

是常数．这时，我們可以把这非綫性系統当作具有緩变变化参量的綫性系統来处理．能够用这种方法研究的系統叫作久期微扰系統，它的理論在引力天文学中起着很重要的作用．

把生理上的若干震顫大致当作若干久期微扰系統来处理，是十分可能的．在这样的系統中，我們可以很清楚地看到，为什么稳定状态的振幅和頻率一样也是确定的．假設这系統的某一个要素是一放大器，并假設当系統的輸入在一长时間内的平均值在增加时，放大器的增益減少．于是，当系統建立起振盪时，放大器的增益会一直減削到系統到达平衡状态为止．

关于非綫性张弛振盪系統，有些場合已經用希耳（Hill）和邦加来的方法研究过了[1]．研究张弛振盪的經典場合，是系統的方程为微分方程的場合，特别是低阶微分方程的場合．当系統未来的行为依賴于它的全部过去的行为时，这是积分方程的場合；据我所知，目前对这种情形还沒有什么足够的研究．但是，我們不难大体說一下它的理論所应当采取的形式．特别是当我們只注意周期解的时候．这时，方程中各个常数的微小变化会使运动方程发生微小的、因而接近綫性的变化．例如，令 $Op\{f(t)\}$ 是 t 的一个函数，它是对 $f(t)$ 进行非綫性运算后产生的，它受平移的影响．于是，和 $f(t)$ 的变分 $\delta f(t)$ 对应的 $Op\{f(t)\}$ 的变分为 $\delta Op\{f(t)\}$，这时系統发生的动力学上的变化对 $\delta f(t)$ 說是綫性的但不是齐次的，虽然对 $f(t)$ 說是非綫性的．如果我們已知

$$Op\{f(t)\} = 0 \tag{4.55}$$

的一个解 $f(t)$，并改变这力学系統的性质，我們就得到 $\delta f(t)$ 的一个非齐次綫性方程．如果

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n e^{in\lambda t}, \tag{4.56}$$

而且 $f(t) + \delta f(t)$ 也具有周期性形式：

$$f(t) + \delta f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} (a_n + \delta a_n) e^{in(\lambda+\delta\lambda)t}; \tag{4.57}$$

1) Poincaré, H., "Les Méthodes Nouvelles dans la Mécanique Céleste".

則

$$\delta f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta a_n e^{i\lambda n t} + \sum_{-\infty}^{\infty} a_n e^{i\lambda n t} i n \delta\lambda t. \tag{4.58}$$

$\delta f(t)$的綫性方程中的所有系数都能展成 $e^{i\lambda nt}$ 的級数，因为 $f(t)$本身能够展成 $e^{i\lambda nt}$ 的級数. 因此，我們得到一个包括无限个方程的 $\delta a_n + a_n, \delta\lambda$ 和 λ 的非齐次綫性方程組，它可以用希耳的方法来求解. 在这时，至少可以設想从一个綫性方程(非齐次的)出发应用逐步求近法，来求得非綫性张弛振盪問題的一个很普遍的解. 然而，这个工作还有待于将来.

在一定意义上說，这一章討論的反饋控制系統和上一章討論的补偿系統性質上是相媲美的. 它們都能使一个效应器的复杂輸入-輸出关系变为簡单的比例关系. 如我們前面看到的，反饋系統的作用还不止此，它的运轉相对地說不依賴于效应器的特性和特性的变化. 因此，这两种控制方法的相对有用性，取决于效应器的不变性. 我們自然認为最有利的場合是把这两种方法組合起来使用. 組合的办法有很多种，下图說明一种最簡单的組合办法:

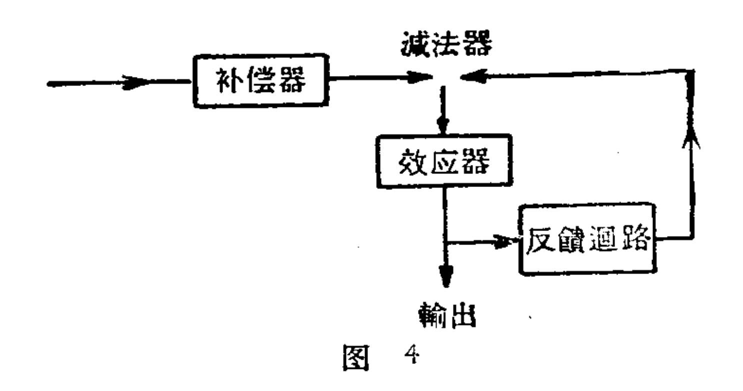


图 4

在上图中，可以把整个反饋系統看成一个更大的效应器，这样，除了必須把补偿器安装得能够补偿在一定意义上表示反饋系統的平均特性的那个量以外，这个图就没有什么新穎的地方了. 另一种类型的組合装置如图 5.

这里，补偿器和效应器組合成一个更大的效应器. 这样安排一般会改变最大許可反饋量，从这样的安排中，我們不容易看出为什么它往往能使反饋量有相当程度的增加. 此外，在同样大小的

反饋量下，这种装置显然能改善系統的运轉．例如，如果效应器具有延迟的特性，則补偿器就要是一个預报器或預測器，这个預測器是針对輸入的統計系綜而設計的．这样的反饋可以叫作預报反饋，它起着催促效应器机构动作的作用．

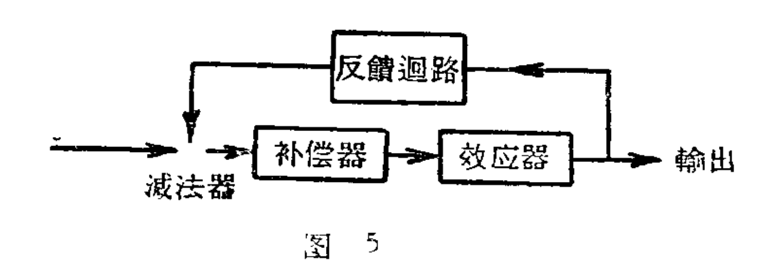


图 5

这种普遍形式的反饋一定能在人类和动物的反射中发現．当我們射猎野鴨时，我們希望減到最小程度的誤差不是枪的位置和目标的实际位置間的誤差，而是枪的位置和目标的預期位置間的誤差．任何防空炮火控制系統都一定遇到同样的問題．关于預报反饋的稳定性条件和有效性条件，目前还需要作更透彻的討論．

当一輛卡車駕駛在結冰的道路上时，我們会看到另外一种有趣的反饋形式．我們的整个駕駛操作依賴于对路面滑溜情况的知識，即依賴于对車-路系統运轉特征的知識．如果我們想依靠这系統的普通运轉获得这个知識的話，那么，我們在得到这个知識以前可能就滑出去了．因此，我們必須不断給駕駛盘以小而迅速的力，这些力不会使卡車更严重地滑出去，却完全足够向我們的运动神經报告这卡車是否有滑翻的危险，我們就根据这些消息来調节駕駛操作．

这种控制方法可以叫作**信息反饋控制**，我們不难把它图解成机械的形式，在实际中使用它是完全值得的．在这个机械形式中，包括一个用来补偿效应器的补偿器，它的特性可以由外界加以改变．我們在传入的消息上，加上一个弱的高频輸入；并从效应器輸出中取出同样高频的那一部分輸出，用一个适当的濾波器使它与輸出的其他部分分离开来．为了知道效应器的运轉特性，我們必須考察高频輸出对輸入的振幅-周相关系．根据这个关系，就可以适当地改善补偿的特性．这种系統的示意图很多，如下图所示：

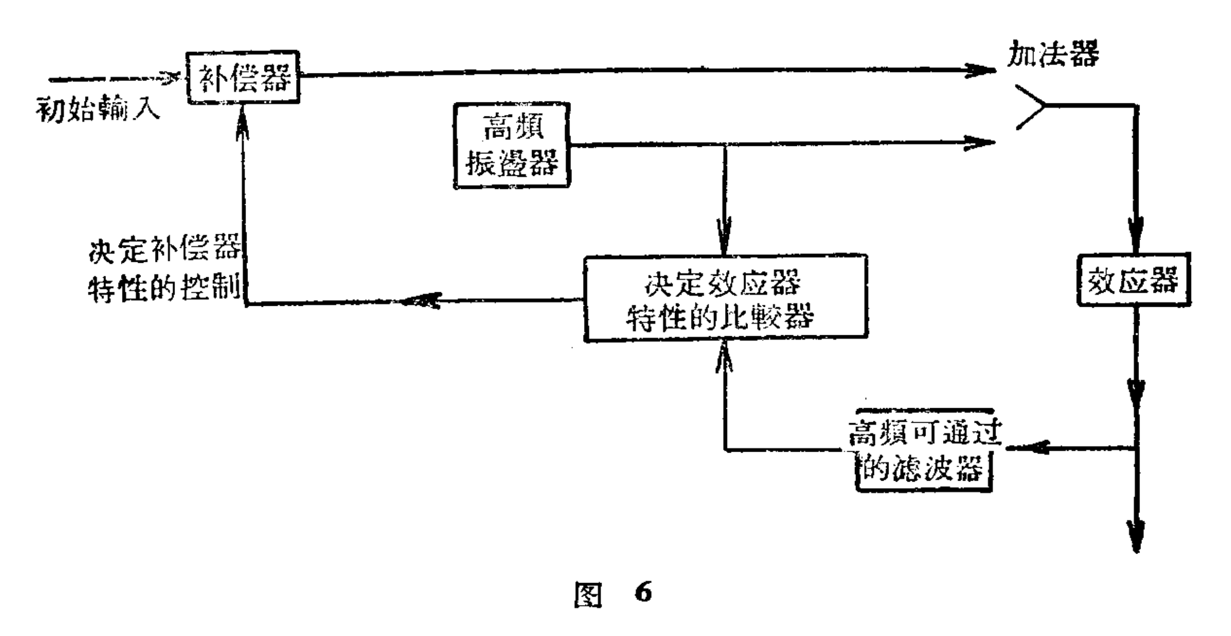


图 6

这种形式的反饋的优点，是可以校准补偿器，使得它对任何种类的不变負載都是稳定的；而且，如果負載特性的改变比起初始輸入的变化来足够慢（这种改变的方式我們前面叫作久期式的），如果負載条件的讀数准确，那么系統就不会产生振盪．有很多場合，負載就是按照这种久期的方式改变的．例如，炮塔上炮的摩擦負載依賴于所擦油的硬度，而这又依賴于溫度；但在炮塔轉动不多时这个硬度是沒有显著变化的．

当然，只有在高頻負載特性与低頻的相同或者能适当地由后者来表示时，信息反饋才能工作得很順利．这种場合往往在負載特性（因而效应器的特性）涉及的可变参数数目相对少时发生．

信息反饋和上面列举的带补偿器的反饋的例子，仅仅是一种很复杂理論的特殊情况，这个理論还沒有研究得很完整．整个理論正在迅速发展中．在最近的将来我們必須予以更多的注意．

在結束这一章以前，我們不要忘記反饋的原理在生理学上还有一个重要的应用．在很多場合，一定形式的反饋不仅是生理現象中常見的例子，而且它对生命的延續也是絕对必要的，我們在所謂稳态（homeostasis）的情形中可以看到这点．高級动物的生命，特别是健康的生命，能够延續下去的条件是很严格的．体温只要有摄氏半度的变化，一般就是疾病的征候；如果有长时間的五度变化，就不能保持生命．血液的滲透压和它的氫离子浓度必須保持在严

格限度内. 体内的废物在浓度达到有毒以前必须排泄出去. 此外,白血球和抵抗感染的化学防疫作用必须保持适当的水平;心搏率和血压必须既不太高也不太低; 性生殖周期必须符合种族的生殖需要;钙代谢必须既不使我们的骨质松化,也不使我们的组织钙化,等等. 一句话,我们内部组织中必须是一个由恒温器、氢离子浓度自动控制器、调速器等等构成的系统,它相当于一个巨大的化学工厂. 我们把这些总起来叫作稳态机构.

稳态反馈与随意反馈和姿势反馈有一个很大的差别, 稳态反馈进行得比较迟缓. 因为几分之一秒内发生的生理上的稳态的改变,就使身体遭受严重而经久的创伤,这样的情况是少见的,即使对于大脑贫血来说,也不会发生这种情况. 因此,进行稳态的神经纤维(交感神经系和副交感神经系)往往是无髓鞘的,我们知道,它们比有髓鞘纤维的传导速度迟缓得多. 典型的稳态效应器(平滑肌和分泌腺)的动作比起随意活动和姿势活动的效应器(横纹肌)的动作来也是迟缓的. 有许多有关稳态系统的消息是通过非神经通道传导的,这些非神经通道就是心脏肌纤维的直接吻合,或化学媒介,例如荷尔蒙、血液中的碳酸气等等; 除了通过心脏肌纤维传导的场合,它们一般也比有髓鞘纤维的传递方式迟缓.

任何一本关于控制学的教程, 都应当透彻详尽地讨论稳态的过程, 有关这个过程的许多个别情形已经在文献中相当详尽地讨论过了[1]. 但是, 对本书说,与其说对这个问题已作了一个概要的论述, 不如说只是作了一个引导. 上述稳态过程的理论需要比较详尽的一般生理学知识.

1) Cannon, W., The Wisdom of the Body, W. W. Norton & Company, Inc., New York, 1932; Henderson, L. J., *The Fitness of the Environment*, The Macmillan Company, New York, 1913.

第 五 章

計祘机和神經系統

計算机本质上是一种記录数字、运算数字并給出数字結果的机器. 它的成本中的很大一部分，无論就經济方面說或就建造的劳力方面說，都花費在数字要記录得清楚而准确这个簡单問題上. 最簡单的記录数字的方式似乎是利用均匀刻度尺，上面附有一个能够移动的游标. 如果我們希望記录一个数字准确到 n 分之一，那么必须保証在尺上任何一个区域中游标所指的位置都具有这个准确度. 这就是說，当信息量为 $\log_2 n$ 时，我們无論怎样移动游标都必須要滿足这个准确度的要求，这时記录的耗費可以写成 An 的形式，这里 A 約为常数. 更确切地說，由于 $n-1$ 个区域中滿足了准确度的要求，剩下的那个区域也一定滿足准确度的要求，所以記录信息量 I 的耗費大致为

$$(2^I - 1)A. \tag{5.01}$$

如果計这个信息分布在两个尺上，而每个尺的刻度的准确度要小一些，这时，記录这信息量的耗費大致为

$$2(2^{\frac{I}{2}} - 1)A. \tag{5.02}$$

如果計这个信息由 N 个尺来記录，記录的耗費近似地为

$$N(2^{\frac{I}{N}} - 1)A. \tag{5.03}$$

这个量当

$$2^{\frac{I}{N}} - 1 = \frac{I}{N}\cdot 2^{\frac{I}{N}}\log 2 \tag{5.04}$$

时具有最小值，或者令

$$\frac{I}{N}\log 2 = x, \tag{5.05}$$

当

$$x = \frac{e^x - 1}{e^x} = 1 - e^{-x}. \tag{5.06}$$

这个等式当且仅当 $x = 0$ 或$N = \infty$时才能成立. 这就是說，为了使貯藏信息的耗費最低，N 应当尽可能的大. 我們知道，$2^{I/N}$ 必須是一不等于 1 的整数，因为当 $2^{I/N} = 1$ 时，这意味着要用无限个尺，而每一个尺却不包含一点信息. $2^{I/N}$ 最有意义的数值是 2 ，这时，我們的数字記录在一組彼此不相关的尺上，而每个尺又分为两个相等部分. 换句話說，我們在一組尺上用二进位制来表示数，在二进位制的尺上，我們只需知道一个固定量落在尺的两个相等部分的这一边或另一边，而且，所观察的量不能肯定落在尺的哪一半，这种可能性小得簡直可以忽略. 这就是說，数 ν 可以表成下列形式：

$$\nu = \nu_0 + \frac{1}{2}\nu_1 + \frac{1}{2^2}\nu_2 + \cdots + \frac{1}{2^n}\nu_n + \cdots, \tag{5.07}$$

式中的每个 ν 或者为 1 ，或者为零.

現代的計算机可以分为两大类型. 象布希 (Bush) 微分分析器那样的[1]，叫作模拟計算机，在这种机器中，数据用某种連續尺上的量度来表示，因而其准确度取决于尺的构造的准确程度；象通常枱式加法或乘法机那样的，叫作数字計算机，在这种机器中，数据用一套可能事件的一組选择来表示，而其准确度取决于这些可能事件能够加以区别的明晰程度，取决于每次选择时可供挑选的可能事件的数目，和給定的选择次数. 因此，对于要求高度准确的計算說，用数字計算机总是比較合适的，尤其是根据二进位制制造的数字計算机，因为在这种数字計算机中每次选择时可供挑选的可能事件为 2 . 我們之所以采用十进位制的計算机完全是由历史的偶然所决定的，根据十个手指建立起来的計数尺度，早在印度人发現

1) *Journal of the Franklin Institude* 所載 1930 年以后的各論文.

零的重要性和坐标記数的优点时，就已采用了．当大部分計算需要依靠以常用的十进位制形式把数字送入机器，而取出的数字必須用同样形式表示的那种計算机来完成时，十进位制的計算机还是值得保留的．

其实这就是通常的枱式計算机的使用，例如在銀行中，企业机关中和許多統計研究部門中所使用的．但是，对于更大型的和更自动化的用起来最方便的計算机説，采用十进位制幷不是最好的方向；一般說，任何一种計算机之所以被使用，是由于用它比用手更快．在任何形式联合起来使用的計算手段中，就象任何联合的化学反应一样，整个系統的时間常数的数量級由最緩慢的一种决定．因此，在任何复杂的計算过程中要尽可能消除人的因素，只是在最初和最終的运算阶段，在这些絕不可免的地方才用到人，做到这点是很有好处的．在这时，应当有一个改变記数制度的工具，以便在計算过程的最初和最后阶段应用；而所有中間的运算过程則用二进位制来完成．

因此，理想的計算机必須在运算一开始就放入所有的数据，以后必須尽可能沒有人的干与直到运算終了．这就是說，我們不仅必須在运算开始时把数据放入机器，而且在計算过程中，組合这些数据的全部規則也必須以指令的形式放入机器，这些指令应估計到計算过程中可能发生的各种情况．因此，計算机既要是一个算术机器，又要是一个邏輯机器，它必須根据系統的算法把可能发生的事件組合起来．用来組合可能事件的算法可以有許多种，在已知最好的算法中最簡单的一种叫做邏輯代数，或者叫作布尔（Boole）代数．这种算法和二进位制算术一样，都是以二分法为基础的，即以是或否的选择，在类中或不在类中的选择为基础的．这种体系比其他体系更为优越的原因，和二进位制算术比其他算术更为优越的原因相同．

所有放入机器的数据，无論是数字的或是邏輯的，都用两个二中择一事件的一系列选择来表示；数据的全部运算也采取由一系列旧的选择决定一系列新的选择的形式．当我們把两个一位数

字 A 和 B 加起来时，就得到一个二位数字，如果 A 和 B 都是 1，头一位数字就是 1，否則是 0；如果 $A \neq B$，第二位数字是 1，否則就是 0. 多位数字的相加遵从类似的法則，但比較复杂. 二进位制的乘法和十进位制的一样，可以簡化为乘法表和数字的加法；二进位乘法的法則有着特別簡单的形式，如下表所示：

×	0	1
0	0	0
1	0	1

(5.08)

因此，二进位乘法不过就是由給定的一組旧数字决定一組新数字的方法.

在邏輯方面，如果 0 是一个否定的判断，1 是一个肯定的判断，那么每个运算子都可以由以下三种运算构成：**否定**，它使 1 变为 0，0 变为 1；**邏輯加法**，如下表：

⊕	0	1
0	0	1
1	1	1

(5.09)

；和**邏輯乘法**，它的乘法表和(5.08)的(1，0)制数字乘法表相同，即

⊙	0	1
0	0	0
1	0	1

(5.10)

这就是說，計算机在进行运算时，不过就是根据事先决定的一套固定規則从 1 和 0 这两个数字中进行一系列新的选择. 換句話說，計算机是由一組結构相同的替續器构造起来的，每个替續器只能处在两个状态中的一个，即“通”或“不通”；对于每一运算步驟，各个替續器的状态由前一运算步驟中若干个或全部替續器的状态来决定. 可以由某个中央同步装置或若干中央同步装置来准确地“确定”这些运算步驟的动作时間；也可以設法使每个替續器的状态保持不变，直到所有应在运算过程中动作得較早的替續器完成了全部規定步驟后，它們才动作.

計算机中使用的替續器可以是各种各样性質的. 它們可以是純机械性的；也可以是电-机械性的，例如电磁替續器，这种替續器

的电枢可以一直保持两个可能平衡状态中的一个，直到某个适当的脉冲輸入使它建立起另一状态为止．它們也可以是具有两个相反的平衡状态的純电学系統，这种系統可以用气体充电管构成，也可以用动作迅速得多的高真空管构成．替續系統的两个可能状态在沒有外界干扰时可以都是稳定的，或者只有一个状态稳定而另一状态是过渡性的，在第二个場合下，一定要(在第一个場合一般也要)有一种特殊的装置，把准备在将来动作的脉冲保存起来，幷避免計算机因某个替續器自发地、无限地重复同一动作时所发生的障碍．以后我們还要比較詳細地来討論这个关于記忆的問題．

我們知道，能够做計算系統所做工作的人和动物的神經系統，它們的元件动作起来就象理想的替續器，这个事实值得我們注意．这些元件就是所謂的神經元或神經細胞．它們在电流影响下虽然显示一些比較复杂的性質，但它們通常的生理活动极其符合“全或无”原理，就是說，它們或者处在休止状态；或者在“激发”（“fire”）时历經一系列与刺激性質和強度几乎无关的兴奋．首先，一个兴奋从神經元的一端以确定速度传递到另一端，接着就是不应期(refractory period)，在不应期中，神經元或者不能再被刺激，或者至少不被任何正常生理过程所刺激．在这个有效不应期終止以后，神經元仍然保持休止状态，但可以再被刺激而动作起来．

因此，实質上可以把神經看作一个只具有两个动作状态的替續器：激发和休止．除了从游离末梢（free endings）或感覚末梢器（sensory end-organs）获得消息的那些神經元，每个神經元得到的消息都是由其他神經元从它們的接触点处輸入的，这些接触点叫作突触（synapse）．一根传出神經元的突触数目可有几个到几百个．在各个突触上，传入冲动的状态与传出神經元自身先前的状态組合起来决定传出神經元是否要激发．如果它既未激发也非不应，而且在某一很短的融合时間內如果“激发”的传入突触数超过了一定的閾值，那么經过已知的确定不变的突触延迟时間后，这个神經元就会激发．

也許这个图景过于簡单了，可能“閾值”不是簡单由突触数决

定,而是由它們的"权重"(weight)和它們彼此之間的几何关系(相对于从这些突触得到冲动的神經元而言)所决定的;目前我們已有十分令人信服的証据說明,神經系統中有一种不同性質的突触,即所謂"抑制性突触";这些突触的作用是:或者完全阻止传出神經元激发,或者至少是提高传出神經元对于平常突触刺激的閾值. 然而,我們已經十分清楚,和一定神經元具有突触連結的各传入神經元上的各个冲动,只有按照某种确定的組合才能引起那个神經元激发,而其他結合則不能引起它激发. 这不是說不可以有其他非神經元性的影响,也許还有一种液遞性的影响,这种影响能够使足以引起激发的传入冲动組合方式发生緩慢的、經久性的变化.

神經系統的一个很重要的功能就是記忆,如前所述,計算机也同样要求具有这个功能,它是保存过去运算結果以待将来使用的一种能力. 我們下面将看到,記忆有各种各样的用途,任何簡单的机构都不可能完全滿足这多种用途对它提出的要求. 首先,記忆对实現一个流动的过程是完全必要的,例如对乘法,在乘法中,当运算一旦完成后,所有的中間結果就沒有价值了,这时运算的装置应当空出来作其他的用途. 这样的記忆应当記录得快,讀得快,也要清除得快. 此外还有一种記忆,是計算机或大脑中相当于档案的記忆部分,叫經久性的記录;它是計算机未来全部行为的根据,至少是机器在一次运轉中全部行为的根据. 順便提一下,我們运用大脑和运用計算机的方法有一个重要的区别:机器先后所要作的各个运算程序之間沒有什么关系,或者只有最小限度的关系;其中每个程序运算后都能清除掉;但是,大脑在自然过程中,即使基本上清除它过去的記录也是不可能的. 因此,大脑在正常情況下并不和計算机完全类似,但和正在完成一次运算程序中的計算机比較,倒頗为类似. 我們以后将看到,这一点在精神病理学和精神病学中有其深刻的意义.

現在回到記忆的問題. 建立短时間記忆的一个十分令人滿意的方法,是使一序列冲动沿着一个封閉綫路进行,一直到这环路被外来干扰所清除为止. 我們有許多理由相信,大脑在所謂表面上的

現在[1](specious present)的那些冲动时，就是这种情形．这种方式已經在若干装置中模仿了，并已采用到計算机中，或者至少有人提議这样做．这种存儲装置要求滿足两个条件：冲动的传递应当在一种容易产生长时間滞后的介质[2]中进行；在装置发生的差錯还沒有使冲动过分模糊以前，它就应当尽可能明晰地重新建立起来．第一个条件使我們不能利用光传递来产生延迟，甚至在許多場合也不能利用电路产生延迟，但利用这种或那种弹性振动来产生延迟則是有利的：实际上，計算机就是利用弹性振动来产生延迟的．如果用电路产生延迟，每个阶段产生的延迟就比較短；否則，如同一切綫性装置中的情形那样，消息的变形是暴进的，很快消息就变得面目全非了．为了避免这点，必須作上述第二个考虑：我們必須在綫路的某个地方装入一个替續器，它不是用来重复传入消息的波形，而是用来引发預定波形的新消息．这在神經系統中很容易做到，神經系統中所有的传递或多或少都是扳机現象（trigger phenomenon）的传递．在电器工业中，我們早已知道有了这种用途的装置，它用在电报綫路中．这套装置叫作**电报型中継器**．运用这套装置来作經久性記忆的最大困难，就是它們必須在經受一个接一个的、大量的运算周轉时不发生一次事故．目前，这方面已經得到了惊人的成就：在曼彻斯特大学威廉先生設計的一套机器中，这种装置的单位延迟时間約为百分之一秒，它能成功地連續运算数小时之久．更惊人的是，这个装置不仅仅能保存一个判断，一个“是”或“否”，而是能保存成千个判断．

和其他形式的記忆大量判断的装置一样，这个装置是根据扫描原理来工作的．在比較短的时間內貯存信息的一个最簡单的方

1) 表面上的現在——也叫心理学的現在．严格地說，即是过去的事情，在內心中也覚得是現在的事情的那种心理內容．即，这种心理現象可以看作是具有表面上的現在型的記忆．——日譯者注．

2) 这大概是依据脑皮的刺激所引起的神經元綫路的循环兴奋的东西．与美国巴特萊·比肯普（Bishop）等所謂的循环綫路說（theory of reverberating circuits）有关系．請参看下面論文的暫时扫描說（temporal scanning）：Pitts, W. and McCulloch, W. S., *Bull. of Math. Biophysics*, 9, 127 (1947).——日譯者注．

式，就是电荷貯藏在电容器中的那种方式；如果还配合上电报型中继器，这就成为一个很合适的貯存方式．为了最有效地利用这种貯藏系統的綫路設备，我們希望电容器能逐个地很迅速地轉接到另一个电容器．通常是利用机械慣性来达到这个目的，但这不能有超高速性．一个好得多的方法是使用大量的电容器，其中一个电极可以是一小块金属噴到一块电介質上，也可以是电介質本身的非完全絕緣表面，作为这些电容器的一个接綫器（connector）的是一束阴极射綫，这束射綫在扫迴綫路的电容器和磁石的作用之下，按照一种类似田里犁地的过程那样移动．目前已經有各种不同的精巧装置来实現这个方法，实际上，在威廉先生使用这方法以前，美国无綫电公司就已經以另一不同的方式来使用它了．

上面提到的这些貯存方法，即使不能把消息保持到象人的生命的时間那样长，也能保持相当长的时間．如果要求更經久的記录，則有广泛的方法可供挑选．除了使用穿孔卡片和穿孔带这类笨而慢的不能清除的方法外，还可以使用磁带，已有能大大消除消息在磁带上的散开的最新改进品；此外，还有使用磷光物質的方法；尤其是使用照相方法．当然，照相法是作經久性和詳尽記录的理想方法，从記录一次观察需要的曝光时間应当短这个观点看，它也是理想的方法．但是，它还有两个严重的缺点：显象时間虽然已經短到只有几秒鈡，可是如果要使照相法对短时間記忆也能有效，它还是不够短的；其次，目前的事实是，照相記录不容易迅速清除掉并迅速記入新記录．依斯特曼（Eastman）公司的人員正在研究这些問题，看来不是一定不能解决的，可能这时候他們已經找到答案了．

我們上面考虑的許多貯存信息的方法，共同具有一个重要的物理要素．这就是，它們似乎都是高度量子簡併性的系統；换句話說，都是振动方式很多但頻率相同的系統．鉄磁性物質的情况就是这样，具有很高介电常数的物質的情况也是这样，因此这些物質特別适合用来作貯存信息的电容器．磷光現象同样是高度量子簡併性的；照相过程中也显示同样性質的效应，显象用的許多物質似乎都是具有大量内部共振的物質．量子簡併性的出現，是由于这种

物质具有某种由很小的原因就能产生显著而稳定的结果的能力.我们在第二章中看到,新陈代谢和生殖作用的许多问题与高度量子简并性物质有关.下述的事实也许并不偶然:在无生命环境中,我们发现高度量子简并性的物质具有生命体的第三基本性质,这就是,它的接受冲动和组织冲动;并使这些冲动对外界产生效应的能力.

我们在照相和其他类似过程中看到,可以用若干贮存元件发生经久性的改变的方式,来贮存消息.当反过来要把这个储存信息重新注入系统时,必须使这些改变去影响正在通过系统的消息.有一个最简单的方法可以做到这点,这就是我们以系统中在正常情况下参与消息传递的、能够改变状态的部分作为贮存元件,而且这些元件必须具有这样的性质,即因储存了信息而引起的元件特性的改变能够影响整个未来传递消息的方式.在神经系统中,神经元和突触就是这种贮存元件,信息所以能长期贮存在大脑中,很可能是由于神经元阈值的改变,或者采取另一个实质相同的说法,是由于每个突触对消息的透过率有改变.现在对这个现象还没有更好的解释,许多人认为,实际上信息是能按照这种方法贮存在大脑中的.可以设想,这样来贮藏信息所以可能,或者是由于新的传导路径被打通,或者是由于旧的传导路径被封锁.人在出生以后,大脑中就再不生成什么新的神经元,这显然已是充分确立的事实.可能也没有什么新的突触形成,虽然这一点还不能完全确定;而记忆过程中阈值的改变主要是在增加,这也是合理的推测.如果一切果真如此,我们的全部生命就是按照巴尔扎克在驴皮记(Peau de Chagrin)里描写的那种方式进行的:在生命自身浪费掉我们生命力的积蓄以前,学习和记忆过程本身就耗尽了我们的学习能力和记忆力.很可能这个现象的确存在.这是衰老的一种可能解释.然而,衰老的实际现象是非常复杂的,仅仅用这种说法不足以解释.

我们已经说过,计算机,乃至大脑,是一个逻辑机器.这种自然的和人造的机器对逻辑学有什么启发,考虑这个问题不是一件

轻而易举的事．这方面的工作主要是由图灵（Turing）进行的[1]．我们说过，推理机器（machina ratiocinatrix）无非就是用机器来进行的莱布尼茨的推理演算器（calculus ratiocinator）；现代的数理逻辑也正是从这种推理演算出发的，因而目前计算技术的发展必然对逻辑学问题有新的启示．今天的科学是操作的科学[2]，这就是说，今天的科学认为每一种陈述本质上都联系到一些可能的实验或可观测的过程．根据这个观点，逻辑问题的研究，必然归结为对逻辑机器（神经的或机械的）的研究、和对于这些逻辑机器的所有不可消除的局限和不完整性的研究．

有些读者也许要说，这是把逻辑学归结为心理学，而这两门科学显而易见不同，并且可以证明是不同的．许多思惟的心理学状态和过程并不符合逻辑规范，就这个意义来说，这种见解是对的．心理学包含很多逻辑学以外的东西．但是，重要的是：任何对我们有意义的逻辑都不能包括人的智力所不能包括的东西，也就是不能包括人的神经系统所不能包括的东西．所有的逻辑，都因人的智力在进行所谓逻辑思维时的局限，而受到限制．

例如，有许多数学理论专门从事关于无限的讨论，但这些讨论和它们相应的证明事实上都不是无限的．任何一种可以接受的证明都包含有限数目的步骤．不错，运用数学归纳法所作的证明似乎包含无限个步骤，但这只是表面的．事实上，它包含下列有限个步骤：

（1）P_n 是对应于数 n 的一个命题；

（2）P_n 对 $n=1$ 的场合已经证明了；

（3）如果 P_n 是真的，P_{n+1} 就是真的；

（4）因此 P_n 对每个正整数 n 都是真的．

自然，在我们所作的逻辑假设中，必须有一个证明论证有效的假设．然而，这里的数学归纳法和关于无限集的完全归纳法远不是一回事．对于更严格的数学归纳法形式，例如某些数学部门中

1) Turing, A. M., "On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem", *Proceedings of the London Mathematical Society*, Ser, 2, 42, 230—265 (1936).

2) 此处维纳抱有操作主义的哲学观点．——俄译者注．

的超限归納法，情形也是如此。

这样，就会发生一些有趣的情况：我們也許能够——只要有足够的时間和够用的数学手段——对定理 P_n 的每一单独場合予以証明；但是，如果我們沒有系統的方法把这些証明归諸一个与 n 无关的論証，例如象数学归納法那样，我們也許就不能对所有的 n 来証明 P_n. 在所謂元数学中就承認有这种特殊的情况，这个部門主要是由高德(Gödel)及其学派发展起来的.

一个証明表示一个用有限步驟达到确定結論的邏輯过程. 但是，一个遵从确定規則的邏輯机器并不必要达到結論. 它可以通过不同阶段不断运轉，永不終止，这时它可以或者是描画出一个愈来愈复杂的活动图案，或者是进入一种反复过程，如同一盘棋在行将終局时由不断的"将軍"构成的連續循环一样. 在康脫和罗素的悖論中，就有这种情形. 让我們来考慮由所有的自身不是自身的元的类构成的类. 这个类是不是自身的元呢？如果是，那么肯定它不是自身的一个元；如果不是，那么同样又可以肯定它是自身的一个元. 計算机在回答这个問題时，会不断作出相間的答案："是"，"不是"，"是"，"不是"，一直下去；不能稳定下来.

罗素解决自己的悖論的方法，是給每个状态規定一个量，叫作型，根据命題所涉及的对象（无論这些对象是最簡单意义下的"事物"，或是"事物"的类，或是"事物"的类构成的类，等等）的特性，罗素用型这个量来区别形式上似乎相同的命題. 我們現在也用对每个命題規定一个参数的方法来解决这种悖論，这个参数就是命題陈述的时間. 在这两个場合下，我們可以把引进的量都叫作均匀化参数，它用来解除仅仅由于我們的疏忽而产生的迷惑.

由此可見，計算机的邏輯和人的邏輯十分相似，根据图灵的意見，我們可以用它来說明人的邏輯. 計算机是否也有比較高級的人类特征——学习能力呢？为了看出它也可以有这个特性，让我們来考慮两个彼此密切有关的概念，即观念联合的概念和条件反射的概念.

在英国經驗哲学学派中，从洛克到休謨，都把人的心灵内容看

成是由某种东西构成的，洛克把这些东西叫作观念，休謨則把它們叫作观察或印象．他們假設，簡单的观念或印象存在于純粹被动的心灵中，心灵对它所包含的观念沒有影响，如同一块干淨的黑板对可以写在上面的記号沒有影响一样．他們又假設，由于某种內在活动（很难叫作力），这些观念根据类似原則、邻接原則和因果原則而联成一束．在这些原則中，最重要的也許是邻接原則：一羣观念或印象往往在时間中或空間中一同出現，它們具有一个喚起另一个的能力，因此其中任何一个的出现就会招致整羣的出現．

总之，这里包含一种动力学意义，但是动力学观念到現在还沒有从物理学滲透到生物学和心理学．十八世紀典型的生物学家是林耐（Linnaeus），他是一个蒐集家和分类学家，他的观点与今天的进化論者、生理学家、遺传学家和实驗胚胎学家的观点十分对立．的确，面对着世界上这么許多材料要去考察，当时的生物学家們的精神面貌很难不如此．同样，在心理学中，心理內容的概念压倒了心理过程的概念．現在还有人認为名詞是本質的而动詞的重要性不大，这大概是經院式地強調实体的遺风．虽然如此，但是，象巴甫洛夫的工作这样的例子表明，从这些靜力学观念跨向今天更具动力学的观点的步伐，还是很明显的．

巴甫洛夫的工作很多是在动物上进行的而不是在人身上进行的：他研究的是可見的动作，不是內省精神状态．巴甫洛夫发現，食物能引起狗的唾液和胃液分泌增加．如果在有食物而且仅仅在有食物时，給狗看某个可見物体，那么在沒有食物时，它看到这个物体也能刺激唾液或胃液的流出．洛克由內省观察到的由于观念邻接而发生的观念联合，現在变成了类似的行为方式的联合．

然而，巴甫洛夫的观点和洛克的观点之間有一个重要区别，这完全因为洛克考虑的是观念而巴甫洛夫考虑的是动作方式．巴甫洛夫观察到的应答，是促成实現一个能产生成功結果，或是避免災害的过程．唾液对咽下食物和消化都有重要的意义，而避免痛苦的刺激能使动物不遭到軀体上的損伤．因此，在条件反射中一定参与了某种东西，可以把它叫作**情調**（affective tone）．我們不必要

把它和我們自己的苦乐感覚联系起来，也不必要把它抽象地和动物的利益关系联系起来．重要的問題是，情調是按某种尺度，从負値—“痛苦”—向正値—“快乐”来变化，情調的增加在相当长时間內或者永远地有利于神經系統当时进行的全部过程，并使这些过程具有进一步增加情調的二次能力；情調的減少則傾向于抑制神經系統当时进行的全部过程，并使这些过程具有进一步減少情調的二次能力．

当然，从生物学上說，較大的情調主要应当出現在有利于种族繁荣的場合，虽然这对个体不一定有利；而較小的情調主要应当出現在不利于种族繁荣的場合，虽然这对个体不一定有害．任何不符合这个要求的种族，都要走上卡諾尔的“牛油面包上的蒼蝇”的道路，最后总要灭亡．然而，即使是一个走向灭亡的种族，只要它还継續存在，情調机构仍然有效．換句話說，即使具有最自杀性的情調配置的种族，它也有确定的行为方式．

我們要注意，情調机构本身就是一个反饋机构．我們甚至可以用图解把它表示如下：

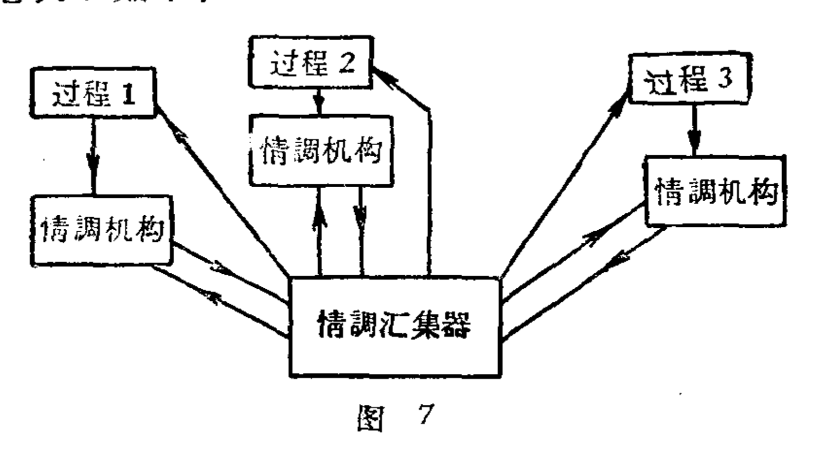


图 7

这里，情調汇集器按照某种規則把各个分散的情調机构在过去短时間內发出的情調結合起来，我們現在不必要来說明这种規則．从汇集器返回到各个情調机构的綫路，是用来根据汇集器的輸出，改变各个过程的固有情調，这种改变一直保持到有新的消息来自汇集器才有新的变化．从汇集器返回到各过程机构的綫路，在总情調增加时，用来降低閾值；而在总情調減少时，則用来提高閾值．这些綫路也是长时間性的，一直等到另一个来自汇集器的

冲动到来，才有所改变．然而，这个延长作用只限于在返回消息到达的时候实际存在的那些过程才具有．对各个分散的情調机构的效应，也有类似的限制．

我想强调一下，我不是說，条件反射的过程就是按照我所描述的机制进行的；我不过是說，它可以这样进行．但一旦假定了这种机制或其他类似的机制，我們就能談到許多有关它的問題了．其中一个問題是，这种机制是能够学习的机制，我們已經了解，条件反射是学习的机制，这个观念在行为主义者研究老鼠在迷宫中学习时就已經采用了．当老鼠在迷宫中时，全部的关鍵在于：在我們所用的誘导或懲罰中，分别具有正的和負的情調．实际情形肯定是这样的，因为受試者不是簡单地用先驗的考虑而是根据經驗来学习情調性質的．

研究这样一种机制也是相当有趣的：这种机制能将一定的消息羣，不經过神經系統而送到所有处在接受它們的状态的那些元件上去．这些消息羣可以是从情調汇集器返回来的消息，在一定程度上，也可以是从情調机构到汇集器的消息．汇集器不一定要是一个独立的元件，它可以仅仅代表一种作用，这种作用能将来自各个情調机构的消息加以自然的結合．这些“敬告所有与此事有关者”(to whom it may concern)式的消息，完全可以用最低的装置成本，通过其他非神經性通路，最有效地发送出去．例如，通常一个矿区的通訊系統都包括一个电話中心站以及相应的綫路和各种装置．当发生紧急状态要人們都离开矿区时，我們不是依靠电話中心站来发消息的，而是靠打破通风入口处的硫醇[1]管来使人們获得消息的．象硫醇或象荷尔蒙这类的化学送信者，对于不是发給特定接受者的消息說，是最簡单最有效的送信者．現在讓我插进一个看着象純粹是空想的問題．荷尔蒙活动所具有的那种易于引起感情和激动的性質是很发人深思的．这并不意味純粹神經机构不能是情調的机构和学习的机构，而是意味我們在研究心理活

1）硫醇——一种氧被硫所替代的醇，具有恶臭的液体．——俄譯者注．

动这方面时，不能不看到荷尔蒙传递消息的可能性．在弗洛依德(Freud)的理論中，把記忆——神經系統的貯存功能——和性活动这两方面概括到一起，可是如果把上面的看法和这个学說联系起来，大概就是极端的空想了．一方面是性，另一方面是全部的感情內容，有一个很強的荷尔蒙要素把两者联接起来．性和荷尔蒙的这个重要性是莱特文博士和塞尔弗烈兹先生向我提到的．虽然現在还沒有适当証据来証明这个說法的正确性，但原則上显然不是荒謬的．

在計算机的性能中，幷沒有什么阻碍它显示条件反射的东西．我們要記住，一个在动作中的計算机，不仅是設計者設計在其中的替續器和貯存机构的連結．它还包含計算机貯存机构所儲存的內容；这个內容在机器一次运轉的过程中是不能完全清除掉的．我們前面提到，与其說計算机的整个机械結构和个体生命相当，不如說它的一次运轉和个体生命相当．我們也提到，在神經計算机中，信息所以能长期貯存起来，很可能是由于突触透过率的改变；我們完全能够建造一个用这种方法儲存信息的人工机器．例如，我們能够使任何消息进入儲存系統时，以一种經久性地或半經久性的方式，改变一个或若干个眞空管的柵偏压，这样就改变了引起眞空管接通所必需的脉冲总数．

更詳細地考虑計算机和控制机构中的学习装置及其用途，不宜由这本入門性質的书来作，最好把这个工作交給工程师去作，在本章以下的部分中，談談現代計算机的几个已經成功的普通用途，也許更合适些．計算机的主要用途之一就是解偏微分方程．当数据涉及到正确地表示两个或两个以上变数的函数时，即使对綫性偏微分方程，要編制它們也需要記录大量的数据，因为精确地描述两个变数或多个变数的函数需要很多数据．对双曲綫型方程，例如波方程，典型的問題是当給定初始数据时求方程的解，我們可以从初始数据順序地得到以后任何給定时刻的結果．对拋物綫型方程，大多数場合也是如此．对于自然数据是边界值而不是初始值的椭圓型方程，求解的自然方法包括一个逐步近似的累进过程．

这个过程需要反复进行許許多多次，因此，象現代計算机的那些高速方法是不可缺少的.

在非綫性偏微分方程場合，不象綫性微分方程那样有一个合理有效的純数学理論. 这时，計算机方法不仅对处理特殊情形下的数字解显得十分重要，而且，正如馮·諾意曼指出的，在为了熟悉大量的特例以便建立一个普遍理論时，它也是必要的. 在一定程度上，我們已經借助价格高昂的实驗仪器实現了这个要求，例如借助于风洞. 我們就是通过这个途径了解到冲激波、滑脫面、湍流等等現象的許多极其复杂的性質，而对于这些現象，我們还根本沒有建立一个适当的数学理論. 究竟还有多少尚未发現的类似現象，我們不知道. 模拟計算机的准确度比数字計算机的要小得多，在大多数場合下也慢得多；因此，后者在将来是大有指望的.

現在已經清楚，使用新的計算机要求它特有的純数学技巧，这种技巧和运用笔算或容量較小的計算机时所使用的完全不同. 例如，在使用能計算中等高阶的行列式的計算机时，或使用能解二十个或三十个联立一次方程的計算机时，我們要遇到在研究低阶的类似問題时所不会发生的困难. 除非在处理問題时非常小心，不然，我們完全可能丢掉任何有效数字的解. 一般認为，象快速計算机这样精密的有效工具，如果掌握在沒有足夠熟練技巧来充分利用它的人手中，是不能发揮它的力量的. 快速計算机少不了需要具有高度理解水平和技巧訓練的数学家.

在計算机的机械結构或电結构中，有几个原則应当加以考慮. 一个原則是，有些比較經常用到的机器，象加法机或乘法机，应当装配成只适合某一特定用途的相对标准化的形式；那些不經常用到的机器則应当在要用到它时，由一些也能用到其他目的的元件来湊成. 与此密切有关的另一个原則是，在这些通用的机构中，各个部件应当根据它的通用性来得到利用，不应当把它們固定地和其他装置特定地联系起来. 机器中应当有一部象自动电話交换台那样的装置，能夠自动寻找空着的組成部件和各种連接器，并且在需要它們的时候将它們接通. 这样，就会大大避免由于机器中

大量元件不經常使用而产生的很大浪费，因为这些元件只能在用到整个机器时才用得上。我們將看到，这个原则对我們考虑神經系統的运輸問題(traffic problems)和过載是很重要的。

最后要指出的一点是，一个巨大的計算机，无論是机械装置形式的，或电装置形式的，或是大脑本身，都要浪费掉大量功率，所有这些功率都被废弃掉了，并且都逸散为热。从大脑中流出的血液，要比进入大脑的血液溫度高几分之几度。沒有任何一种計算机的能量消耗接近大脑这样經济的程度了。在 Eniac 或 Edvac 这类巨大的計算机中，眞空管灯絲消耗的能量是以千瓩計的。如果沒有适当的通风和冷却設备，計算机就要出現一种和机械上发热病相当的状态，直到机器的参数由于热度而发生根本的改变，以致停止运轉。但是，机器每个操作的能量消耗还是小得几乎可以不計，甚至不能成为机器运轉的有效度量。机械大脑不能象初期唯物論者所主张的"如同肝脏分泌胆汁"那样分泌出思想来，也不能認为它象肌肉发出动作那样能以能量的形式发出思想来。信息就是信息，不是物質也不是能量。不承認这一点的唯物論，在今天就不能存在下去。

第六章

完形和普遍观念

上一章討論的各个問題中有这样一个問題，即是用洛克的观念联想学說来說明神經系統机构的可能性．洛克認为联想是按照邻接原則（principle of contiguity）、类似原則和因果原則进行的．因果原則曾經被洛克，尤其是被休謨归結为經常伴随着发生的事物，因而可以归并到第一个原則——邻接原則中．至于第二个原則——类似原則，需要作比較詳細的討論．

当我們側看、斜看或正看一个人面孔的时候，我們怎样把握他的容貌的同一性呢？一个圓，无論是大的或小的、远的或近的，无論是在垂直于从眼球到圓心这一直綫的平面上，因而看来是个圓，或是在其它方位上，因而看来是个橢圓，我們怎样判定它是一个圓呢？从天上云朵或罗夏測驗（Rorschach test）[1]的墨污中，我們又怎样看出了人面、动物或地图呢？这一切都是关于眼睛方面的例子，别的感官也有同样的問題，而且有些問題牽涉到各感官之間的关系．我們怎样用語言来表現虫鳴鳥叫？我們又怎样通过触覚来認出一块硬币的圓形呢？

我們暫且把探討范围限在視覚方面．当我們比較不同对象的形状时，眼睛和肌肉的相互作用确是一个重要的因素，无論这里所讲的肌肉是眼球內部的肌肉，或是使眼球轉动的肌肉，或是使头部轉动的肌肉，或是使整个躯体轉动的肌肉．的确，一定形式的視覚-肌肉反饋系統即便在象蠕虫这样低等的动物界中也是重要的．

1）罗夏測驗——瑞士心理学家罗夏所提出的一种心理技术測驗．这种測驗，根据受試者从墨水污点中看出的图画，来判断他的智力傾向．例如，看出野兽的图画就与思想的刻板有关．——俄譯者注．

蠕虫的背光性(negative phototropism),即迴避光綫的傾向,似乎是由两个感光器官来的冲动的平衡来控制. 这个平衡反饋到躯干上的肌肉,躯体就避开了光; 当它再和一般向前运动的冲动結合时,就会把动物带到附近最黑暗的地方.注意到下面一点是很有趣的:如果我們将一对带有放大器的光电管、一个用来平衡这对光电管的輸出的惠士通电桥和另外一些用来控制两个电动机(推动双螺旋桨机构用的)的放大器等部件組合起来,就可以給一条小船装上一套非常合用的背光控制装置. 要把这个装置縮小到蠕虫可以携带的程度,当然是困难的或不可能的;然而, 我們这里只不过是再举一个例子来說明讀者們早已熟悉的一个事实: 生命体机构的空間尺度比最精巧的人造机构要小得多,但在另一方面,由于使用了电子技术,人造机构在速度上就大大超过了生命体.

让我們撇开各个中間阶段,立即考虑人的眼-肌反饋問題. 有些反饋純粹是自动調节性质的,例如:瞳孔在暗处放大和在亮处縮小,就是要把进入眼睛的光流量限制在一定范围内,使得明暗的变化不至于太大. 另一些反饋与以下的事情有关: 即人眼把它对于形状和色彩感觉的最敏銳部分, 非常經济地局限在相当小的中央凹上;对于事物运动的知觉的較敏銳的部分则局限在网膜边緣.当边緣視覚把亮的、明暗对照強烈的或色彩鮮明的,特别是运动着的对象捕捉到以后, 就有一个反射的反饋把对象带到中央凹. 跟着这个反饋系統出現的是一个有相互連結的副反饋的复杂系統, 它引导两个眼球移动, 使得吸引我們注意的对象落到每个眼睛的視野的相同部分, 同时調节晶状体的焦点尽可能地使对象的輪廓变得明晰. 除了这些动作以外,头部和躯体也作一些补充动作,如果单靠眼睛的运动不能把对象带到視野中心来; 或者当其他感官发現了視野以外的对象时,这些运动能够把它引进視野. 除此以外,我們习惯于从一定方向来考察各种对象——諸如笔蹟、人面、风景等等,这里也有一种把对象推向特定方向的机构.

所有这些过程可以总結为一点: 我們要把任何吸引我們注意的对象放在标准的位置和方向上, 从而使我們所形成的視象能够

在尽可能小的范围内变化. 这些并非是我們知觉事物的形态和內容的全部过程, 但是它确实便利了我們为了达到这个目的而后来进行的一些过程. 这些随后的过程是在眼內和視觉皮质上进行的. 我們有大量的証据說明:就这个过程的大多数阶段来說,每个阶段中用来传递視觉信息的神經元通道的数目都在減少, 同时把視觉信息逐步地变为接近于我們在記忆中使用的和保存的形式.

在視觉信息汇集的过程中, 第一步是网膜和視神經之間的过渡. 应当記住: 中央凹的棒細胞与錐体細胞几乎是和神經纖維一一对应的,但在边緣上,一条視神經纖維可以和十个乃至更多个的末梢器官相对应. 这一点是容易理解的, 只要我們考虑到这样的事实:边緣纖維的主要功能不在于視觉本身,而在于为眼睛的定中心、聚焦和导向机构找到对象.

視觉的最惊奇的現象之一就是我們認識輪廓画的能力. 譬如說, 一幅人面的輪廓画和面部本身在色彩或明暗部分上显然沒有多少共同点,但它可以是这个人的最象的画象. 对于这种現象,最合理的解释是:在視觉过程的某个阶段,輪廓被強调起来, 而影象的其他部分的重要性則被減少到最低限度. 这些过程的起点是眼睛. 和所有感官一样,网膜也有适应作用:一个持續的刺激会使网膜接受和传递該刺激的能力減弱下来. 对于那些紀录具有不变的色彩和照度的一大块影象的內部状况的感受器說来, 适应作用表現得最为明显, 因为即使是焦点和凝視点有些輕微的波动(这在視觉中是不可避免的),也不会改变我們所得到的影象的性質. 但是,在两个对照区域的边界上,情况就完全不同了. 在这里, 焦点和凝視点的移动就会产生交替的刺激;这种交替,如同我們在余象中看到的情况一样,不但不使視觉机构因适应作用而反应減弱,反而提高了它的感受性. 无論这两个邻接区域之間的对照是光強的对照抑是色彩的对照,上述情况都存在. 要解释这些事实,我們应該看到: 視神經中有四分之三的纖維只在发光体"閃"光时才有反应. 因此,眼睛得到事物的最強印象的部位是在边界上,而且事实上,每个視象都具有某种素描的性質.

也許这种作用不全是边緣感覚的作用．在摄影术中，我們知道，一块感光板經过多种处理后可以增加它的明暗对照；这些非綫性的現象肯定沒有超出神經系統所能做到的范围．我們可以把这些現象和我們以前提到的电报上所用的中継器联系起来看．和电报上所用的中継器相似，在視覚現象中，这种中継器使用一个尙未模糊到超出一定程度的印象去引发（to trigger）一个具有标准明晰度的新印象．无論如何，这种現象減少了一个影象所携带的无用信息的总量．这也許跟大脑視覚皮質区域各层中传导纤維数目減少的部分有关．

以上我們把視覚印象产生的过程分解为几个实际的或可能的图式化阶段．我們使我們的影象結聚在注意的焦点的附近，并把这些影象或多或少地簡化为輪廓．其次，我們把它們作相互的比較，或者至少把它們和存貯在我們記忆中的标准印象——例如"圓"或"正方形"——作比較．比較的方法可以有多种．我們前面已經做过一个概略的說明，指出洛克关于联想的邻接原則如何可能用机械来实現．我們应該看到邻接原則在很大程度上包括了洛克的类似原則．我們常常通过下述过程，看到同一对象的不同方面：把对象带到注意的焦点和进行一些其他的动作，使我們能在这个或那个距离，这个或那个角度看到对象．这是一个普遍的原理，不限定在特殊的情况才能使用，而且在比較我們的更为复杂的經驗的时候无疑是很重要的．但是，就我們基于視覚得到的普遍观念或者如洛克所讲的"复合观念"的形成看来，上述过程未必是唯一的．我們視覚皮質的构造是高度組織化的、特殊化的，如果認为它的操作是由一个非常一般化的机构来进行，那是不对的．它給我們这样的印象：在我們面前的是一个特殊机构，这个机构并不簡单是由一些可以通用的元件和一些可以互换的部件临时配合起来的，相反，它是一个如同計算机的加法装置和乘法装置那样固定的部分装置．在这样情况下，研究一下这个部分装置可能是怎样工作的和我們应該怎样把它設計出来都是值得的．

一个对象的所有透视变换构成了我們在第二章已經定义了的

所謂"羣". 这个羣又定义几个变换子羣: 只由那些不涉及无穷远区域的变换所构成的仿射羣;围繞一給定点的均匀膨胀变换,亦即这个点和坐标軸方向以及所有方向上的标度均匀性都保持不变;长度保持不变的变换羣;围繞一个点旋轉的二維和三維的旋轉羣;所有的平移羣等等. 以上所讲的子羣都是連續羣,也就是說,它們的运算决定于在某种相应空間中連續变化的参数值. 因此,它們在 n 維空間中形成多維构形,同时,含有在这个空間中构成区域的所有变换子集.

普通二維平面中的一块区域,被电視工程师所講的扫描过程扫过时,这整块区域是由在該区域中近于均匀分布的一組表样点(sample positions)来代表. 同样,羣空間的每个区域連同整个羣空間也可以用一个羣扫描过程来表示. 在这个不限定在三維空間內使用的扫描过程中,空間內网状分布的一組点被一个一元序列所扫遍,而且这些网点应当这样来分布,使得在适当定义了的某种意义上說,它們能接近区域中每一个点. 因此,这个网所包含的点可以根据需要接近于任何一組被挑选出来的点. 如果这些"点"或参数集实际用来生成相应的变换,那么,用这些变换来变换一个給定图形的結果,可以任意接近于对这图形的任何給定的由一存在于指定区域的变换运算子来实現的变换. 如果我們的扫描十分精細,如果被变换的区域具有被研究的羣所变换的区域的最大空間尺度,那么,經过扫描变换所得到的区域,与对原来的区域作任一变换所得的区域,其重迭的程度可以根据我們的需要达到其面积的任意大的一部分.

因此,我們可以从一个标准的比較区域和一个用来和它比較的区域出发. 在变换羣扫描的任何阶段上,如果被比較的区域在某个扫描变换下形成的象,比給定的允許限度还要完滿地迭合在标准形象上,那么就把它記載下来,并且說这两个区域是相似的. 如果在扫描过程的任何阶段上都不发生迭合,我們就說这两个区域是不相似的. 这个过程完全可以机械化起来,作为識別图形形状的一种方法,而与图形的大小、方向以及与包含在被扫描的羣区

域中的是何种变换无关.

如果这个区域不是羣的全部,那就可能这样:区域A看来和区域B相似,区域B看来和区域C相似,但区域A看来和区域C不相似. 这种情况实际会发生的. 至少,就直接印象(一种不包含任何高級过程的印象)說来,一个图形可以和它的倒图形沒有任何特别相似之处. 但是,在这个图形倒轉的每个阶段上,可以有一个相当范围的邻接位置和它相似. 按照这样方式形成的一些普遍"观念"并不是絕对区别开的,而是彼此有交叉的.

使用羣扫描从羣变换中抽象出普遍观念还可以有其他一些較为复杂的方法. 我們这里考虑的羣都是有"羣测度"的, 即由变换羣自身决定的几率密度, 而羣中所有的变换被該羣中的任一特定变换左乘或右乘而发生变化时, 它仍然不变. 我們可以用这样的方式扫描一个羣: 令一个相当任意性的区域的扫描密度——即扫描变元扫遍該区域的时間总和——和羣测度非常近于正比例的关系. 在这种均匀扫描的情况下, 如果有任一个量依存于羣变换的元所构成的集合 S, 如果这个集合被羣的全部变换所变换,我們把这个依賴于 S 的量表示为 $Q\{S\}$, 并用 TS 表示集合 S 被羣变换 T 变换的結果. 这样, 当我們用 TS 代替 S 时, 則 $Q\{TS\}$ 就是代替 $Q\{S\}$ 的量值. 如果我們对变换羣 T 的羣测度求这个量的平均或积分,則得一个量,可以写成如下的形式:

$$\int Q\{TS\}dT, \tag{6.01}$$

这里是对羣测度求积分的. 量(6.01)对于在变换羣作用下的所有可以相互变换的集合 S 都是恆等的,也就是說,对于所有一定意义下的集合 S,这个量都有同一的形态或完形. 如果(6.01)中的积分不是对整个羣来积分的,如果被积函数 $Q\{TS\}$ 在被略去的区域数值很小,那么,我們就可以对形态作一近似地比較. 关于羣测度要說的就是这些.

近些年来, 人們十分关心用一种感官来弥补另一种感官的缺陷的問題. 在各种弥补缺陷的尝試中,最引人注目的就是使用光电管的盲人讀字器的設計. 我們假定这方面的尝試只限于印刷物,

甚至只限于一种或几种字型。我們还假定把頁面放平正、对准字行以及从这一行到下一行的移动等是用人手或自动地进行，后一种是可以实現的。我們可以看到：这些过程与我們依靠肌肉反饋，并使用正常的对准、定向、調准焦点以及使两眼一致的装置而得到視覚完形的过程相当。进一步的問題是要在扫描装置順序地扫过各个字母的时候測定它們的形状。有人主张按垂直方向依次安排几个光电管，这些光电管各自与不同音調的发音装置相連結。这可以对字母黑色部分用不发音或发音来記录。假定我們采取这个办法，并假設三个光电管接收器一个接一个地迭起来。令这些接收器象一个弦的三个音調一样来描述字母，字母上部为高音，下部为低音。于是，大写字母 F 可以記作：

————　　高音持續的时間；
———　　中音持續的时間；
——　　低音持續的时間。

大写字母 Z 記作：

————
　——　；
————

大写字母 O 記作：

　——
——　——　；
　——

等等。加上我們理解能力的帮助，这种听觉符号不是太难讀的，譬如說，不会比盲人用的凸字更难讀。

但是，这一切决定于一个条件：光电管罩和字母上下的高度要有适当的关系。我們知道，即使是标准字型，它們的大小还是很不相同的。因此，扫描在垂直方向的标度应当可大可小，以便把字母的印象变为标准印象。至少，我們应有一些通过人工或自动的方法来实現的属于垂直方向的膨胀变换罩的变換装置。

有几个办法可以达到这个目的。我們可以使光电管作垂直方

向的机械調节．另一个方法是把大批的光电管垂直排列并随字型大小改变音調的分布，使得位在字型上面和下面的那些光电管都不发音．这可以如下图所示的办法来实現，我們可以用两組接綫来构成綫路，在这个綫路中，从光电管出来的输入綫連到一串愈来愈散开的电开关上，各垂直綫則是输出綫．

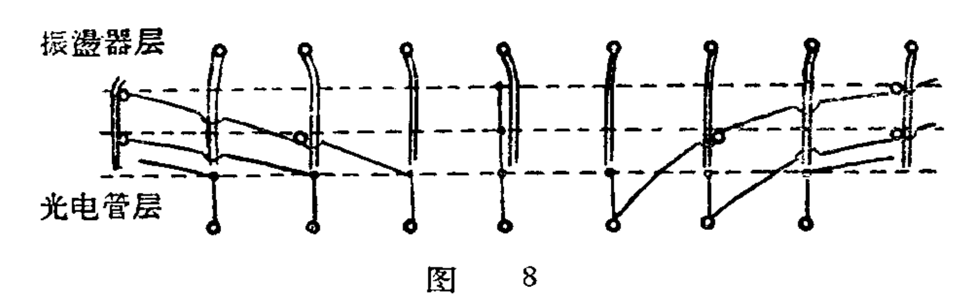


图 8

图中单綫表示从光电管出来的导綫，双綫表示接到音頻振盪器上去的导綫，虛綫上圓圈表示传入和传出导綫之間的連接点，虛綫本身表示用来开动某一組音頻振盪器的导綫．这就是我們曾經在导言中提到的麦克卡洛設計的用作調节字型高度的装置．在最初設計时，虛綫之間的选择是靠人手来进行的．

馮·波宁博士看到这个图形后，說它相当于視觉皮質的第四层．連接的圓圈相当于这一层的神經細胞体，这些神經細胞体是分布在各子层中，其分布的水平密度作均匀的改变，而子层的大小則随密度的增加而縮小．水平方向的导綫能够按照某种循环的次序被激发（fired）．全部装置看来完全适合于羣扫描的过程．当然，还必須有一个随时将上部的输出加以重新結合的过程．

这就是麦克卡洛建議的实际用来探究大脑中視觉完形的仪器．它是一部可以用作各种羣扫描的典型仪器．其他感觉的情形也和視觉相似．在人耳中，从一个主調到另一个主調的音乐轉調无非就是頻率对数的轉移，因而也可以用羣扫描的装置来进行．

因此，羣扫描机构有它确定的、对应的解剖学上的結构．所需的开关动作，可以借助于一些专門的水平导綫来实現，这些导綫提供足够的刺激来改变各层的閾值，使得当某一导綫与該层接通时，可以通过閾值的改变，来調节引起該层細胞达到兴奋状态所合适的刺激量．虽然我們不知道这个机器运轉的全部詳細情况，但是

不难猜想出一个与解剖学結构相一致的一种机制. 总而言之，羣扫描机构完全可以成为大脑的一种固定部件，它相当于数字計算机中的加法器和乘法器.

最后，扫描装置应該具有一定的固有的操作周期，这个周期应該与大脑的整个动作相一致. 这个周期的大小程度应当是直接比較大小不同的对象的形状时所需的最短时間. 只有当两个对象大小相差不太悬殊的时候，这种情形才有实現的可能，否则，扫描过程就是一个长时間过程，需要由一个非专門机构来完成. 如果能够直接比較对象，则需要的时間为十分之一秒数量級. 这和在循环序列中刺激所有横向連接綫层所需要的刺激时間在数量級上似乎也是一致的.

虽然这个循环过程是一个可以局部决定的过程，但我們有証据証明皮質各部分有普遍的同步性，可以設想这是由某个計时中心驅动的結果. 事实上，脑动电流記录图(electroencephalogram)表明：它的頻率和大脑 α 节律(rhythm)固有的頻率的数量級相同. 我們可以猜想 α 节律和形状知觉有关，它具有扫描节律的性質，就象电視机扫描过程所显示的周期性一样. 这种現象在熟睡的时候消失了；当我們注視某一物体的时候，的确如我們所猜想的，它似乎被其他节律混扰和叠盖了；扫描节律成了其他节律和其他活动的負載者. 值得注意的是：当我們在淸醒的时候閉着两眼，或者象在瑜伽(Yogi)的抽象环境中那样凝視着一无所有的太空[1]，这时候的 α 节律具有一种近似完全的周期性.

如上所述，我們看到感官补缺的問題把原来由某一損坏的感官所传递的信息由一健康的感官代替传递的問題——是一个重要的而且不一定不可解决的問題. 使得这个問題更有希望得到解决的事实是：由一种感觉所正常激发的記忆区域和联想区域并不是象一把鑰匙开一把鎖那样只属于这种感觉，而是可以用来存貯这

1) 瓦尔特(W. Grey Walter)博士自英國布列斯特的私人通信.

种感觉以外的其他感觉所提供的印象. 一个盲人，如果不是天生的，他不但可以保留瞎眼以前的視觉記忆，而且能够以視觉形式存貯触觉和听觉的印象. 当他在室内走动时，他不但能摸索出自己的道路，而且对房子还有一个看起来应当如何的視象.

因此，盲人可以得到部分正常的視觉机构. 另一方面，他损失的不仅是两只眼睛：他还损失了运用視觉皮质部分（它被認为是构成視觉印象的固定机构）的能力. 因此，要弥补他的缺陷，不仅要用人造的視觉接受器，而且要用人造的視觉皮質，以便把这个新接受器上的光印象翻譯为与他的視觉皮質的正常輸出相关連的形式，使得通常看来是相似的对象現在变为听来是相似的对象.

因此，判定用听觉代替視觉是否可能至少部分地是与皮質各层上可以加以区别的視觉模型和听觉模型的数量之間的**比較有关**. 这是信息量的比較. 鑑于感觉皮質的不同部分具有組織上的某种类似，大脑皮質的两个不同区域之間的面积比較作为判定的根据可能不会相差很远的. 視觉与听觉面积之間的比例大約是100:1. 如果听觉皮質全部用于視觉，我們可以期望得到的信息接受量大約相当于通过眼睛得到的信息量的百分之一. 另一方面，我們估計視力的通常标准是对某形象获得某种程度的分辨能力的相对距离，因此，百分之一的視力就是正常情形下百分之一的信息量. 这是非常低的視力，但是，肯定还沒有全瞎，具有这样程度的視力的人也不自認为是瞎子.

从另一个角度看，这个图景甚至是更有利的. 仅仅用百分之一的視力就可以代替听觉去識別全部听觉的細微差异，还留下大約百分之九十五的視力，可以說視觉基本上还是完整的. 因此，感官补缺問題是一个非常有希望的研究領域.

第 七 章

控制論和精神病理学

在开始写这一章时，我必須先交代一下，一方面我既不是一个精神病理学家，也不是一个精神病治疗家，我缺少关于这个領域的任何經驗，而在这个領域里，經驗的指导是唯一可靠的指导。另一方面，我們关于大脑和神經系統的正常动作的知識，还远远沒达到可以信賴一个先驗理論那样完善的地步，更不要說关于它們反常动作的知識了。因此我想事先放弃那种主张，即認为任何具体的精神病理学的現象，例如克拉帕林(Kraepelin)及其学派所記載的那些症状，是由于象計算机一般的大脑組織的特殊故障产生的。誰要是根据本书的一些观点得出这个特定結論，那就由他自己負責。

然而，如果認識到大脑和計算机有許多相同之处，这就可以給精神病理学，甚至精神病治疗学提供一个新的有效的研究方法。这方面的研究也許可以从所有問題中最簡单的一个問題开始：大脑是怎样避免由于个别部件失灵而引起动作上的重大錯誤和重大失敗的？对于計算机，类似的問題具有重大的实践意义，因为計算机的运算过程可以延續进行几小时或几天，而每个运算操作的时間却不到百万分之一秒。很可能，一次計算操作的过程包含10^9个运算操作步驟。在这种情况下，即使弄錯一次运算也决不是可以忽視的。虽然，現代电子学仪器的可靠性事实上已經大大超过最大胆的估計。

在通常用笔算或用枱式計算机来进行的計算工作中，照例要把每一道計算步驟都检驗一下。在找到了錯誤的时候，就从发現錯誤的地方开始一步步往回推算，去寻找錯誤的所在。如果要一

部高速計算机来做检驗工作，检驗工作就要进行得同机器的計算速度一般快，否则，机器的整个有效速度将降低到較慢的检驗过程的速度．此外，如果机器要把計算的全部中間結果的記录都保存起来，那么它的复杂程度和体积都将增加到不可容忍的地步，很可能比原来的大两倍或三倍．

一种更好得多的检驗方法，也是实际上常用的一种方法，就是每一道运算同时交給两套或三套分别的机构去做．在用两套机构的时候，它們能够自动地相互校对答案；如果发生差异，所有的数据就都移存到永久性記忆装置里去，計算机停止动作，并且給操作者发出产生了差錯的信号．然后操作者比較两者的結果，根据結果寻找那个出了毛病的部件，也許是一个眞空管燒坏了，需要更换．如果每一阶段都用三套分别的机构，由于实际上出一次毛病的机会是很稀見的，三套机构中总有两套的答数一致，这个一致的答数就是所求的結果．在这情况下，校驗机构接收多数答案，机器不需要停止，只給出一个表示少数答案和多数答案在哪里发生差异和怎样发生差异的信号．如果在发生差异的最初瞬間就发出信号，那么差錯地点可以十分准确地被指示出来．在一架設計良好的計算机里，一个元件并不是只固定担負一連串运算中的某一特定步驟的工作，而是在每一步驟中都有一个很象自动电話交换机中使用的搜索过程，它会寻找出某一种立即可以使用的元件，把它接进运算序列中去．这样，拆卸和掉换損坏了的元件就不会耽誤大量时間．

我們可以設想而且相信，神經系統中至少也存在两套进行这个过程的元件．我們不能設想任何重要的消息可以交給单个神經元去传递，或是把任何重要操作交給单一的神經机构．象計算机一样，大脑可能也是按照类似卡諾尔在"猎取蛇鯊"的故事里所說的那个原則进行工作的，这个原則就是："我告訴你三次的就是眞实的"．如果訊为传递信息的各个通路就是一般地把信息从一端传到另一端，中間沒有任何吻合，那也是不确实的．更可能的是，当消息到达了神經系統的某一級时，它可以通过所謂"神經元从"

(internuncial pool)中的多个不同途徑由这一級中的一点到下一級去. 誠然,神經系統中也有那样一些部分,这种可更替性受到很大限制或根本沒有,它們大都是大脑皮質中高度专业化的、作为外感觉器官的內延伸的部分. 但是,对于大脑皮質区域中担負着联想作用和所謂高級精神机能的那些比較不专业化的部分,上述原則仍然成立,而且可能更显得突出.

直到这里,我們考虑的是正常活动中的差錯,这只是广义上的病态动作. 現在我們来談一談更明显的病态动作. 精神病理学多少使抱着本能的唯物主义观点的医生感到失望,他們总認为每种症状必然伴随着某个特定組織中物質方面的損伤. 不錯,有些大脑的特殊損伤,例如外伤、肿瘤、血栓等等,可以引起精神症候;也有些特定的精神病,例如不全麻痺,是一般軀体性疾病的后遺症,并伴随脑組織的病变. 但是对于严格的克拉帕林型精神分裂症患者,或是躁郁狂精神病患者,或是妄想狂病患者,我們却无法从患者的大脑病变来分辨它們. 我們把这些疾病叫作机能性疾病;这种区分方法似乎违反了現代唯物主义的教条,現代唯物主义認为,任何一种机能失調必定在有关組織上存在某种生理学的或解剖学的根据.

机能性疾病和器質性疾病的这种区别,可以从計算机的研究中得到很多启示. 我們已經看到,和大脑——至少和成人的大脑——相当的,不是計算机的空洞的物質构造,而是这一构造同运算过程开始时所給的指令以及同运算过程中貯藏起来的和从外界得到的附加信息的結合. 这种信息是以某种物理形式——記忆的形式——貯藏起来的,但其中一部分属于循环記忆的形式,具有随着机器的停閉或脑子死去而消失的物理基础;而另一部分則是长期的記忆,它的貯藏方式我們現在只能加以猜測,但可能它也具有随着死亡而消失的物理基础. 我們現在还沒有方法在尸体上認出一个給定突触在生前具有多大的閾值;即使我們知道了这一点,我們也无法追寻出同这个突触相接通的神經元和突触所形成的鏈,以及作为記录思想內容的这条鏈的意义.

因此，把机能性精神失常基本上看作記忆的疾病，看作大脑在活动中所保持的循环信息的异常，看作突触的长时間透过率(long-time permeability)的异常，也沒有什么奇怪．甚至在不全麻痺这种极其严重的疾病中，大部分症候也不是由于有关組織的破坏和突触閾值的变化产生的，而是由于最初的伤害所必然引起的消息传导的次級混乱、剩下的神經系統和其他消息传递通路的过度負荷所产生的．

在一个包含大量神經元的系統中，循环过程是难以长期保持稳定的．或者就象"彷彿現在"这种記忆过程，循环过程在进行中或者逐漸被削弱，終于消失；或者它們要牽动愈来愈多的神經元，直到占用了神經元丛中过大的一部分．后一情形大概就是焦虑性精神病中見到的恶性忧虑的原因．在这情形下，病人的脑子里可能沒有空余的地方，即沒有足够数目的神經元去进行正常的思索．在这种状况下，也許大脑中的未病的神經元的負担会少一些，因此它們更容易被逐漸扩大的过程牽扯进去．而且，經久性記忆也愈来愈深地受到影响，起先病理过程还在循环性記忆这一級上，后来就可能在經久性記忆这一級上一再頑固地出現．这样，当初只是比較輕微而偶然地破坏了的稳定状态，逐漸就可能完全破坏正常的精神生活．

在机械或电气計算机中，也并不是找不到类似性質的病理过程．齿輪上某个輪齿可以和同它嚙合的輪齿錯开，以致再不能同它恢复正常关系；一个高速电子計算机可以发生似乎无法中止的循环过程．这种意外的起因就是由于这个系統中出現了某种非常不容易发生的瞬間状态，在修理以后，它也許永远不再发生或以后极少发生．但是，当它們发生的时候，就会暂时使机器失灵．

在使用計算机时，遇到这种意外怎么办呢？我們想要做的第一件事，就是洗去机器中的所有信息，希望它在計算别的数据时不再发生故障．若是这样做无效，如果发生故障的地点是信息清洗机构永远或暂时不能达到的，我們就要把机器搖撼一下，或者如果是电气机器，就将异常大的冲击电压送入机器，希望能达到原先不

能到达的部分，以便改变它的状态，使它的錯誤循环活动中止．如果这也失败了，我們可以切断机器上发生故障的部分，因为剩下来的部分可能还是足够应用的．

但是，除了死以外，沒有一个正常的过程可以完全清洗大脑中所有过去的印象；而在死亡以后，就不可能再把脑开动起来．在所有正常过程中，睡眠最象是非病理的清洗了．我們知道，要摆脱一种恼人的焦虑或是思想混乱，睡眠一下是最好的方法．这种情况是多么常見呵！然而，睡眠并不能洗掉較深的記忆，真的，相当恶性的焦虑状态不是用适当睡眠所能驅除的．因此我們常常被迫采用一种剧烈得多的干扰記忆循环的方式．这些方式中更剧烈的是施行大脑外科手术，而手术后将遺留下永久性的伤害和毁損，并且将永远削弱受害者的能力；因为哺乳动物的中枢神經系統似乎沒有任何再生的力量．这方面已經采用的一种主要外科手术是前額叶切除术，这种手术是把前額叶大脑皮質的一部分切除或孤立起来．施行这种手术目前已經很流行，这也許是因为这一方法会使許多病人比較容易看护吧．讓我順便說一句，杀了他們就更容易看护！然而，前額叶切除术对于恶性忧虑似乎有真正的效果，并不是由于它能帮助病人更接近解决他的問題，而是由于伤害或是破坏他保持忧虑的能力（在另一种时行的术語中，把这种保持忧虑的能力叫作良心）．更一般地說，这一方法从各方面限制了循环性記忆——即把当前已不存在的情况保持在記忆中的那种能力．

各种形式的休克疗法——用电、胰島素、五甲烯四氮唑，都是一些比較不激烈的治疗方法，也起着极相似的作用．它們不破坏大脑組織，或至少不以破坏大脑組織为目的，但是它們肯定地能破坏記忆力．因为这些方法只涉及循环性記忆，而且因为在精神失常发病初期主要是循环性記忆受到損伤，而循环性記忆值得保存的价值又不大，所以休克疗法比起脑叶切除术来肯定是值得推荐的．但是它对經久性記忆和个性不是絕对不起有害的作用．按目前的情况来看，它是制止精神上的恶性循环的另一个剧烈的、沒有完全了解的、不能完全控制的方法．但是，这点却沒有妨碍它在許

多病例中仍然作为目前可以采用的最好的方法.

前额叶切除术和休克疗法用来治疗病情比较深的经久性记忆方面的疾病,虽然也可能有些功效,但按其本质说,更适合于治疗带恶癖性质的循环性记忆疾患和恶性焦虑. 我们已经说过,当精神失常迁延很久时,经久性记忆也象循环性记忆一样受到严重的扰乱. 我们似乎没有任何纯粹药物学的或外科的武器可以有区别地作用于经久性记忆. 这正是应该由精神分析和其他精神疗法来插手的地方. 无论这种精神分析是正统的弗洛依德意义上的或是经过江格和亚特勒修改过的意义上的,或者它是不严格属于精神分析的精神疗法,这种治疗仍然清楚地根据如下的一个概念:贮藏在心中的信息,位于不同的级上(就其可以接触的难易来分的),它比直接的没有别的专门方法帮助的内省法所能发掘的要更丰富和多样;它总是被内省法所不能发觉的那种情绪经验强有力地制约着,内省法其所以不能发觉,或者是因为这种经验用成人的语言仍然无法表示出来,或者是因为它被一般是不随意的情绪的特定机构包藏了起来. 这些被贮藏的经验的内容以及它们的情调,基本上规定了我们以后的心理活动,有时这种规定可能带有病态的方式. 精神分析家的技巧就是用一系列的方法去发掘和解释这些潜伏的记忆,使病人实事求是地承认它们,并且通过这种承认去纠正它们,纵然不纠正它们的内容,至少也纠正它们所带的情调,从而减轻它们的危害程度. 所有这些都完全同本书的观点一致. 这也许还能说明,为什么在某些情况下要联合使用休克疗法和精神疗法,即对于神经系统中的反响现象(phenomena of reverberation)把物理疗法或药理疗法和治疗长期性记忆的精神疗法结合起来,因为这种记忆如果不加以干涉,就可能从内部把休克疗法所破坏的恶性循环重新建立起来.

我们已经提到神经系统的信号传导问题. 许多著者,例如汤姆普逊[1]曾经提到过各种形式的有机体的大小都有一个上限,超过

1) Thompson, D'Arcy, Growth and Form, Amer. ed., The Macmillan Company, New York, 1942.

这个界限它就不能活动．例如昆虫机体的大小是由呼吸孔通过直接扩散作用把空气送到呼吸組織中去的呼吸管长度决定的．陆上动物不能大到它的腿或其他和地面接触的部分被它自身的重量所压坏；限制一棵树的高度的是把水和矿物从根部输送到叶子，同时把光合作用的产物从叶子输送到根部的那套机构；其他的例子还有．在工程建筑物中，也可以見到同样的現象．限制摩天楼的高度的是这样一种情况：当它超过一定高度的时候，給上面各层准备电梯所需要的面积占据了下层横截面的过大部分．用具有一定弹性的材料修建的最好的吊桥，如果支柱之間的距离超过一定程度，它就会被自身重量所压坍；用一定材料建造的任何建筑物，如果超出一定的跨度，都会被自身重量所压坏．同样，根据一个固定的、不能再扩张的計划建成的一个电話局的大小，也是受到限制的，电話工程师极透徹地研究了这种限制．

在电話通訊网中，用戶覺得无法把电話叫通的那一段极短的时間就是重要的限制因素．如果叫通的机会是 99%，就是最苛求的人也一定会滿意的；90% 能叫通，这大概也算够好了，因为办起事情来还算相当便利．75% 的接通机会就够麻煩的了，但是还可以勉勉強強地办事情；如果一半电話都叫不通，用戶就会要求拆掉电話．这是总的数字．如果电話要通过 n 个分别的接通步驟，各个步驟的接不通的几率是互不相关而且是相等的，那么要使总接通几率为 p，則每个步驟的接通几率必須是 $p^{1/n}$．因此，要在經过五个步驟后得到 75% 的接通机会，每个步驟的接通几率必須大約为 95%．要得到 90% 的接通率，每一步驟的接通几率必須是 98%．要得到 50% 的接通几率，每一步驟的接通率必須是 87%．这里可以看出，当牽涉到的步驟愈多时，如果通話双方的数目超过某一临界值，整个通話的情况就愈容易急速地变坏；相反，只要通話的数目沒有达到这个临界值，通話的情况就十分良好．例如，一座包括許多步驟的并且設計出一定接通率的交換站，在通話数目到达临界点以前，沒有显著的阻塞情况，但是一到临界点，它就完全失灵，我們也就遭到灾难性的通訊阻塞．

比起所有动物来，人有最发达的神經系統，人的行为可能是依从于那些有效地动作着的神經元鏈中最长的一种鏈，因而人很可能是在过度負荷的边緣上有效地完成着复杂的行为，一旦越过这个边緣，他就会完全崩潰．过度負荷的产生有下列几种形式：或者由于必須传送的信号量过多，由于传导信号的径路在物理上被減少；或者由于不需要的信号系統（例如增加到病理性忧虑程度的循环性記忆）过多地占用了这些通道．在所有这些情况下，都会——突然地——到达这样一点：沒有給正常的信号留出足够的传导通道，因而就会出現例如象瘋狂那样的突然的精神錯乱．

这里首先受影响的是那些最长的神經元鏈的机能和活动．有証据說明，这些机能和活动正是那些在我們通常的評价标准中被認为是最高級的过程．証据如下：大家知道，在生理限界以內的体温上升能够使大多数（即使不是全部）的神經元的活动更为順利．在較高級的（其次序大致按照我們通常对“高級”的程度的評价）过程中，这种影响也較大．因为一个神經元是同别的神經元連成一串的，在单一的神經元-突触系統中，过程的任何促进作用都应該具有累积的性質．因此，某一神經活动过程由于体温上升而得到的总活动能力，可以粗略地作为有关的神經元鏈的长度的量度．

我們由此理解到，人脑所使用的神經元鏈比其他动物要长一些，这就說明为什么人类的精神錯乱肯定地最为显著，并且可能也是最常見的．还有一个更特殊的方法来考虑与此极类似的問題．讓我們考虑两个从几何学意义来說相似的脑子，它們的灰質和白質的重量的比例相同，但有不同的尺寸，其比例是 $A:B$．假設两个脑子中灰質的細胞体体积和白質的神經纤維截面都是同样大小．于是，那两个脑子的細胞数目的比例是 $A^3:B^3$，长距离連結器数目的比例是 $A^2:B^2$．这就是說，当它們的細胞中动作密度（density of activity）相同时，大的脑子神經纖維中的动作密度比小的脑子的神經纖維中的动作密度要大，其比例是 $A:B$．

如果我們拿人脑同下等哺乳动物的脑去比較，我們就发现人

脑的折迭較多．两者灰質的相对厚度差不多相等，但人脑的灰質一直分布到复杂的脑回和脑沟里．这种分布使灰質的数量增多而使白質的数量减少．在一个脑回中，白質的减少主要是纖維长度的縮短，而不是纖維数目的减少，因为一个脑回的对折比它們假如在一块面积大小相同沒有折叠的平滑表面上互相間要靠近得多．另一方面，各个脑回之間的联接綫所必須經过的距离則由于脑的折迭而多少有所增加．因此，人类脑子的近距离联接綫頗为有效，而远距离干綫則并不完善．这就是說，在发生信号阻塞时，最先受到影响的是联系相互远隔的大脑各个部分的那些过程；也就是說，在精神錯乱时，那些牽涉到几个中枢，牽涉到一系列运动过程，牽涉到許多联合区域的过程是最不稳定的．这些过程正是我們通常叫作較高級的过程，因此我們那些似乎有經驗支持的猜测得到了再一次的証实：在精神錯乱时，較高級的过程最先恶化．

还有一些迹象，說明脑中的长距离径路一般有穿出大脑外側并横切低位中枢的趋势．这是可以用割断那些担任远距离联結的大脑白質的一部分弯曲而只发生极輕微損害这一事实来証明的．看起来，这些表面的联結是如此的不妥善，它們之中只有一小部分才是实际需要的．

关于这点，考虑一下慣用左手或右手以及半球优势的現象是很有趣的．在下等哺乳动物中，似乎也有习慣用右側肢体或左側肢体的現象，虽然比起人来，这些現象很不显著，这部分地也許是因为动物动作中要求的組織性和灵巧性較低．但是，即使在較低級的灵长类中，右側和左側肌肉熟練程度的差异程度比起人类来，也要来得小．

大家知道，一个正常的人慣用右手一般是由于他慣用左脑；而少数人的慣用左手則是由于他慣用右脑．这就是說，大脑功能不是平均地分布在两个脑半球上的，其中一个脑半球是优势脑半球，它执行着絕大部分的比較高級的功能．不錯，許多本質上是两側性的功能——例如关于視野的——在其所属的各个半球中都出現，虽然并非所有两側性功能都是如此．但是，大部分“較高級”的

皮质区域都限制在优势半球上．例如，在成年人身上，因为劣势半球上广泛损伤而发生的影响比起优势半球上类似损伤所引起的影响要小得多．巴士特（Pasteur）在少年时期患过右侧脑溢血，使他得了中度的一側痲痺，即半身不遂．在他死后剖驗他的脑子时，才发現他的右脑损害是如此广泛，以致有人說，在他患了脑溢血后，"他只有半个脑子"．在他的顱頂和顳顬区肯定有广泛的損伤．然而他在受到这种伤害以后，仍然完成了几件最好的研究工作．在一个慣用右手的成年人身上，左脑的同样損伤几乎一定会致命，而且一定会使病人智力上和神經上都成为殘废，使他变得象动物一般．

据說，这种情况如果发生在初生时期就要好得多．在出生后头六个月中，优势半球受到广泛的損伤会迫使正常的劣势半球去代替它；因此，比起那些在較大年龄时受到脑部損伤的病人来，这种病人看来更接近于正常．这是同出生后头几周中神經系統所表現的巨大可变性和以后发展的巨大固定性相符合的．在幼童身上，即使沒有这种严重的損伤，一側慣用性可能也是富于可变性的．然而，在儿童入学以前很久，这种天然的一側慣用性和大脑某半球占优势的情况已經被終生确定了．常常有人認为，慣用左手在社会上会遇到重大的不便．这話有些道理，因为大多数工具、課堂桌子、运动設备主要都是为慣用右手的人做的．而且，在过去，有人由于迷信而厌恶使用左手的习慣，正如他們厌恶那些稍稍背离一般人的常态的东西，例如胎記和紅髮．由于各式各样的动机，許多人想通过教育去变更自己孩子的慣用左手的外表习慣，而且甚至得到成功，虽然他們不能变更某一大脑半球占优势的生理基础．以后他們才发現这些优势半球变更的孩子很多都患口吃，并且在言語、閱讀、书写方面都发生障碍，甚至严重地影响他們的前途并丧失正常生活的希望．

現在我們至少看到这个現象的一个可能的解释．在訓練劣势的手的时候，劣势半球上象支配写字这类灵巧动作的区域也受到一些訓練．然而，因为这些动作的实現是同閱讀、講話和其他动作

具有最密切的联系的，而这些动作却都同优势半球不可分割地連結在一起，因此，在这一过程中，神經元鏈必須从一个半球穿到另一个半球，然后又回来．而在一个稍微复杂的过程中，它們就必須一次一次地来回穿行着．但是，象人脑那样大的脑子中，脑半球之間的直接連結器——大脑連合（cerebral commissures）——的数目是如此之少，以至它們很少起作用．因而大脑半球之間的連絡必須繞着远路而通过脑干，我們对于脑干还了解得很不完全，但它肯定是长的，不粗的，可以被阻塞的．其結果，同言語和书写有关的那些过程极易发生信号阻塞現象，而口吃的发生也就最自然不过的了．

这就是說，就有效地利用那些从解剖学上看似乎存在的各种机能这一点来說，人的脑子可能已經太大了．在猫身上，优势半球的破坏比起人身上优势半球的破坏来似乎产生的害处較少，而劣势半球的破坏也許对它的害处更大．无論如何，猫的两个脑半球上的机能分配大体上是相同的．在人身上，由于脑的尺寸和复杂性增加而得到一些益处，部分地被大脑中在同一个时候只有很小一部分能被使用这一限制所抵消．这样来思索一下是很有趣的：我們可能面临着自然界的限制之一，我們的器官从高度专門化到效能衰退，最后到物种消灭．人类的脑子可能是沿着这条毁灭性的专門化道路前进，正象最后的恐龙的巨大鼻角一样．

第 八 章

信息、語言和社会

一个組織中的各个要素本身也是小的組織；这样一个关于組織的概念既不是生疏的，也不是新穎的．古希腊关系松弛的联邦、神圣罗馬帝国及其同时代的类似組成的封建国家、瑞士联邦、尼得兰联邦、美利坚合众国以及中南美的許多合众国、苏維埃社会主义共和国联盟，这些都是政治領域内类似教阶(hierarchies)关系的組織系統的例子．霍布士的利維坦(Leviathan)，即是由非完美无缺的人組成的“世人的国家”，它說明同样一种思想，只是組織程度上較低一些；而萊布尼茨的思想，認为生命机体其实是充滿了其他生命机体(例如血球)的綜合体，也是在同一方向上更前进了一步．这种思想实际上不过是細胞說的哲学先驅．細胞說認为大多数普通大小的动植物，以及所有的大动物、大植物都是由許多单位，即細胞构成的，这些細胞都具有独立的生命机体的許多屬性，即使不是所有的屬性．多細胞机体本身可以成为建造較高級机体的砖块，例如僧帽水母就是由特殊分化了的水螅組成的一个复合体，其中有些个体已經为了要担任营养摄取、个体保持、运动、排泄、生殖和支撑整个羣体等任务而发生各种变化．

严格地說，这种生理上相連結的羣体所提出的組織問題，从哲学上看并不比低級阶段的个体所提出的組織問題更为深刻．在人和其他社会动物身上——例如一羣狒狒或一羣牛，羣栖的海狸，蜂羣，一窝黄蜂或一窝螞蚁——情况就大不相同了．团体生活所表現的整体化程度接近于单一个体的行动所表现的水平；但个体大概有固定的神經系統，神經系統的各元件之間都有永久性位置关

系和永久性联系；而团体却是由許多时空关系可以不断变动，沒有永久的、不可破的肉体联結的个体所組成的．一窩蜂的全部神經組織就是一只一只蜜蜂的神經組織：蜂羣是怎样一致行动的呢？而且这种一致行动又怎么能富于变化、富于适应性和組織性呢？显然，秘密在于蜂羣的成員之間有相互的通訊．

这种相互通訊的复杂性和內容可以大有不同．人的相互通訊包括全部复杂的語言和文献以及許多其他东西．但对螞蚁說，相互通訊大概只是少数几种嗅觉．如果說一个螞蚁能够把一只只的螞蚁都分辨清楚，这大概是不可能的．螞蚁肯定能够分辨自己窩里的螞蚁和别的窩里的螞蚁，它可以同这只螞蚁合作，把那只螞蚁杀死．除了这类少数的外部反应以外，螞蚁的智慧几乎同它被角質包裹起来的身子一样，是定型的、僵化的．这就是为什么我們事先可以料到，一个动物它的生长期乃至学习期同它成长后的活动期会截然分开的原因．这类动物的唯一通訊方法就象体內的荷尔蒙通訊系統一样，是一般性和扩散性的．的确，作为一种化学感觉的嗅觉一般都沒有方向性，它同体內的荷尔蒙作用沒有什么两样．

这里我要插上几句話．哺乳动物中的麝香、麝猫香、海狸香等等具有性吸引力的物質可以認为是社会性的、外部通訊用的一种外部荷尔蒙，特别对于孤独生活的动物，这些物質能够在适当时期把异性吸引在一起，因而是蕃殖种族所不可缺少的东西．我并不是說这些物質一旦到达嗅覚器官以后，起的是荷尔蒙作用而不是神經性作用．如果說它們少到仅仅能够覚察的分量还会起純粹的荷尔蒙作用，这是难以理解的．但是从另一方面說，我們对荷尔蒙作用知道得太少了，因此不能否認极少量的这些物質也有发揮荷尔蒙作用的可能性．而且，麝香素和麝猫香素中由碳原子构成的长而屈曲的环无須大大改組就能构成性荷尔蒙的連鎖环，以及某些維他命和某些癌元所特有的連鎖环．我不想在这点上发表意見，让大家来作这个有趣的猜測吧！

螞蚁聞到各种气味后所采取的行动，看来是极度标准化的；而一个单純刺激（例如传递信息的气味）的价值不但取决于刺激本身

所传递的信息，还取决于刺激的发送者和接受者的整个神經机构．假如我在森林中遇見一个聪明的野蛮人，他不会說我的言語，而我也不会說他的言語．即使我們中間沒有共同的、事先約定的語言符号，我仍然能够从他那里知道許多东西．我只要留心他显出激动或高兴的表情的那些时刻．然后我向四面八方观察，最好特别注意他的目光所投射的方向，把我看到的或听到的东西牢牢記住．不久我就会找出他所关心的东西；这不是由于他用語言把那些东西告訴了我，而是因为我自己观察到那些东西．換句話說，一个沒有固有內容的信号，由于他在那个时候注意到它而在他心中产生意义，也可以因为我在那个时候也注意到那个信号而在我心中产生意义．他能发現我对某些事物特别注意的那个瞬間，这种发現能力本身就是語言，它就象我們两人能够得到的印象范围那样具有多种多样的可能性．因此，社会动物在产生語言以前，也許早就有一种活泼的、能懂的、富于变化的通訊方式．

不管一个种族用什么通訊方式，这个种族所使用的信息量总是可以测定的，并且可以把对种族有用的信息量同对个人有用的信息量区别开来．当然，对个人有用的信息并不就是对种族有用的信息，除非它能改变个人对于其他人的行为，而且这种行为还可能沒有种族的意义，除非别人能把这个行为同其他的行为形式加以区别．因此，要决定某一种信息是属于全族的还是純粹对个人有用的，就要看个人所采取的行动方式是否被种族中其他成員看作特定的行动方式，以及是否能逐一影响这些成員的行动等等．

我提到种族．这个名詞对于大多数社会团体的信息的作用范围来說，确实过于广泛．本来，团体的界限只相当于团体信息能够有效地传递到的那个界限．我們可以給团体定义一种测度，只要比較一下从外界給予这个团体的判断数目和团体內部作出的判断数目就可以做到这点．我們可以借此来测定这个团体的自治程度．一个团体有效大小的测度，就是这个团体达到一定自治程度所必需的大小．

一个团体比起它的各成員来可以有更多或更少的集体信息．

暂时集合的一羣非社会性动物，即使牠的个体成員有很多信息，也只有很少的集体信息．这是因为一个成員的行为很少受到别的成員的注意．别的成員很少因此动作起来再継續传布影响．另一方面，在人类組織中却完全有可能比它的任何一个細胞有多得多的信息．因此，在种族、部族或团体所有的信息量与个人所有的信息量之間，沒有哪一类一定多，哪一类一定少的关系．

同个人所有的信息一样，种族在某一时期使用的信息也不是无須經过特殊努力就能得到的．大家知道，图书館由于自身藏书过多而有难以活动的趋势；科学也因为发展到如此的专业化程度，以致专家們一越出自身精細的专业便常常毫无所知．布希博士建議利用机械的方法去寻找浩如烟海的文献資料．这些机械方法可能有用；但是它們也是受到限制的，因为除非某专家已經确認某一本新书应該属于那一部門，否則我們就不可能在分类的时候把这本书分到哪个部門里去．如果两門学科的方法和內容相同，但分属于两个远隔的学术領域，那么分类工作就几乎需要象莱布尼茨那样兴趣广泛的人来担任．

联系到团体信息的有效量問題，必須指出：社会政治組織中，最令人惊异的一个事实就是它极度缺乏有效的內稳定过程．有一种信仰在許多国家都流行而在美国更几乎成为国教．这个信仰說，自由竞爭本身就是一种內稳定过程：在一个自由市場里，交易者的个人自私性，即每人尽可能地設法卖貴买賤，最終将使价格趋于稳定，并且有利于最大多数人的利益．这是和一种极乐观的看法有关的，这种看法就是：当某个企业家在設法增进自己的利益时，在某种形态上他多少也是公众的一个恩人，因此他理应得到社会給予他的巨額报酬．不幸的是，事实駁斥了这种簡单的理論．市場是賭局；实际上，它就象是壟断資本的家族賭場．因此，它严格地服从馮·諾意曼和摩根斯特恩所发展的一般博奕理論．这个理論的基础是假定每个参加博奕的人在每一阶段上根据他当时得到的信息，使用一种完全理智的策略来进行博奕，这种策略保証他最終能得到期望中的最大可能报酬．因此，市場上的賭博是由完全

理智的、完全无情的賭手来进行的．即使在只有两个賭手的情况下，这一理論也很复杂．虽然这个理論常常使博奕进行的路綫是死板的．然而，在許多有三个参加者的場合，以及在极大多数有很多参加者的場合，博奕的結局就非常难于确定也非常不稳定．各个参加者由于本身的貪慾不得不結起同盟；但这种同盟一般并不能使他們采取統一的、决定性的行动，而是常常以互相出卖、背叛和欺詐告終，这种情况在較高級的商业界生活中或是极为类似的政治、外交和战爭生活中太常見了．这种情形长此下去，即使最聰明的最无原则的唯利是图的人也会傾家蕩产；如果这些唯利是图的人对此生厌，同意和平共处，最大的报酬就会落到那个等待时机以便撕毁协定、出卖同伴的人身上．这里沒有任何的內稳定作用．大家都被捲入繁荣和衰落的商业周期中，捲入接二連三的独裁制和革命中，捲入那种人人受到損失的战爭中，这是当前时代的一个眞正特征．

当然，馮·諾意曼把博奕者看作完全理智的、完全无情的人，这是一种抽象，也是对事实的歪曲．一大羣十足聰明十足无原则的人互相勾心斗角，这是十分稀見的．当騙子聚集在一起的时候，一定也会有傻瓜．当傻瓜聚集得相当多的时候，他們就給騙子提供更为有利的剝削对象．傻瓜的心理已經成为很値得騙子去認眞注意的題目．傻瓜并不是按照馮·諾意曼的博奕者的行为方式去寻求自己的最終利益，他的行动是可以預測的，就象迷宮中的老鼠一般．这一种說謊方法——即不說眞話——会使傻瓜去购买某一种牌子的香烟；那一种說謊方法可以引誘他去投某个候选人——任何候选人——的票，或者去参加政治迫害，如某一政党所希望的．把宗教、色情文学和伪科学恰当地配合起来就能推广某一画报的銷路．某种甜言蜜語、賄賂和恐吓的混合物会引誘一个年輕的科学家去研究导弹或原子弹．为了把这些事情办成，我們有一套机构去調查无綫电听众的意見，去举行选举測驗，去进行輿論抽查以及其他的心理研究；而且总会有統計学家、社会科学家、經济学家把自己的一套本領出卖給这些事业．

对我們說还算是幸运的，因为这些說謊的商人和这些使得容

易受騙的人們遭殃的剝削者的伎倆还沒有达到炉火純青的境界，还沒有使他們能够为所欲为. 这是因为沒有一个人是十足的傻瓜或是十足的騙子. 一个普通人同他直接关心的东西打交道的时候总是有些理智的，对于公共利益或是自己亲眼見到的別人的苦难总是有些利他精神的. 在一个已經存在很久的因而具有划一的理智和行为水平的小小乡村社会里，人們对不幸者的关怀，对路政和其他公共事业管理，对于一再地违反社会规則的人的容忍态度方面，都有一个很可尊敬的标准. 这些人終究是存在的，別的人总得继續同他們一起生活. 另一方面，在这样的社会中，对那些老想高出他人一头的人是不合适的. 有种种方法使他感到社会輿論的重压. 經过一个时期，他会感到这种輿論是如此的无所不在，如此的不可避免，如此的限制人和压制人，以致他为了自卫起見而不得不离开这个社会.

因此，小而紧密地結合着的社会有极大程度的內稳定性，不管这种社会是文明国家中的具有高度文化的社会或是原始野蛮人的村落，都是一样. 縱然許多野蛮人的习俗在我們看来是奇怪的，甚至是令人厌恶的，但它們一般都有极明确的內稳定性价值，人类学者的一部分任务正是要去解释这点. 只有在大的社会里，那些大亨們才可以靠財富使自己免于飢餓，靠隐居和埋名改姓逃避社会輿論，靠誹謗法和拥有各种通訊工具来抵制私人批評；只有在这样的社会里，殘忍才能到达它的最高峯. 对于社会所有这些反內稳定的因素来說，通訊工具的控制是最有效也是最重要的.

本书的教訓之一就是，任何組織所以能够保持自身的內稳定性，是由于它具有取得、使用、保持和传递信息的方法. 在一个过于大的社会里，社会成員无法直接相互接触. 因此，出版物(包括书籍和报紙)、无綫电、电話网、电报、邮递、剧院、电影院、学校、教堂就都成了取得、使用、保持和传递信息的工具. 它們除了具有作为通訊方法这个內在重要性以外，还有其他的次要作用. 报紙是广告的工具，也是給报紙老板賺錢的工具；电影和无綫电也是一样. 学校和教堂不仅是学者和圣人的庇护所，还是“大教育家”和

主教的家. 一本不給出版家賺錢的书大概是不会付印的，而且肯定是不会再版的.

我国的社会是以买卖为基础的社会，这是大家公認的，在这里，无論自然資源或是人力資源都被認为是具有足够魄力去剝削这些資源的第一个实业家的絕对財产，通訊工具的次要方面愈来愈侵占它的主要方面. 由于通訊本身日益精巧并且需要更多費用，这就更加助长了上述的情况. 乡村报紙虽然可以使用自己的記者去采訪村子里的消息,但是它要出錢去购买国內新聞,去购买由报业辛迪加发行的特写和"鉛板"式的千篇一律的政論. 无綫电台依靠广告得到收入,誰給錢誰就来点曲子,到处都是一样. 大的新聞采訪部化錢太多了，一个中等資本的出版商是供給不起的. 书籍出版家集中出版那些可能一下子被讀书俱乐部全部包买下来的书籍. 大学校长和主教,即使他們沒有取得个人权力的野心,也得維持一个非常化錢的机构,他們只能到有錢的地方去找錢.

因此,从各方面看,通訊工具都受到重重約束: 賺錢少的被代之以賺錢更多的;而这些工具都掌握在极少数的富人阶級手里,因而自然是表达这个阶級的意見的; 因为通訊工具是取得政治和个人权力的一种主要手段，它們首先吸引来的是那些对这种权力抱有野心的人. 什么通訊系統比所有别的系統应該对社会內稳定性更有貢献,它就直接被掌握在那些最醉心于爭权夺利的人的手中，而我們已經知道，这种爭夺是社会中主要的反內稳定性的因素. 因此,絲毫不必奇怪,遭受这种破坏势力影响較大的社会比起較小的社会来，可以共同使用的信息反而少得多. 至于构成所有社会的个人的內部通信組織(神經系)，那就比社会好多了. 国家就象狼羣一样(虽然我們希望不至于如此)，它比它的大多数成員更为愚蠢.

上述的意見同大企业領导人、大实驗室負責人等等所鼓吹的那种見解相反,他們認为,因为社会比个人大,所以比个人有理智. 主张这种見解的人一部分只是由于象小孩子一样的喜欢大、喜欢鋪张的心情,一部分是由于有人以为大的組織可能好一些. 但是,

其中不少人不过是着眼在寻找获利的机会和满足貪慾.

另外有一羣人对現代社会的无政府状态不满，他們有一种总以为能想出办法的乐观心情，这使他們过高地估計了社会中可能有的內稳定因素. 纵然我們对这些人会表示同情，我們了解他們在情緒上处在进退維谷的境地，但是我們不能給这种如意算盘以太高的估价. 这种想法就象老鼠想給猫掛上鈴鐺一般. 无疑的，对于我們这些老鼠說，給这个世界上的掠夺性的猫都掛上鈴鐺是极可喜的，但是誰去掛呢？誰給我們保証无情的权力不会回到那些最貪图权力的人的手中去呢？

我提起这一点，因为我有些朋友非常希望这本书里可能包含的新思想会发生某种社会效用，我認为这是虛假的希望. 他們确信人們对物質环境的控制已远远超出人們对社会环境的控制和理解. 因此，他們認为当前的主要任务是把自然科学中的方法推广到人类学、社会学、經济学方面去，希望能在社会領域里取得同样程度的胜利. 他們起初相信这样做是必要的，进而相信这样做是可能的. 在这点上，我認为他們表示了过分的乐观，并且誤解了一切科学成就的性質.

一門精密科学的所有巨大成功都是在这样的一些領域里得到的，在那里，可以把观察者与現象高度地分离开来. 我們在天文学中見到，这种分离是由于某些現象比起人来太巨大了，因此即使人費尽力气，也不能对天体世界发生絲毫影响，更不要說光是看它一眼了. 另一方面，在現代原子物理学，即关于无法形容的微小东西的科学中，我們做的任何事情的确对許多个别粒子都起影响，而且这种影响对各个粒子来說是巨大的. 但是，无論从空間上或时間上說，我們都不是生活在象粒子那样的标度中. 一个观察者按照其生存的标度来看認为可能有巨大意义的事件，在我們看起来只是由大量粒子合作产生的平均集体效应——不錯，有些例外，例如在威尔逊云室的实驗中. 就这些效应来說，其时間間隔对个别粒子及其运动說来是很大的，因此我的統計理論有符合要求的足够基础. 总而言之，要去影响星辰的运行，我們太渺小了；要去观察

分子、原子和电子，我們又太大了，因而只能观察它們的集体效应．在这两种极端情况下，我們同我們所研究的現象进行相当松弛的耦合，我們只是从这种耦合中得出集体性的总的解释，虽然这种耦合对我們說来还不够松弛到可以完全忽略的程度．

在社会科学中，极难使被观察的現象和观察者之間的耦合減到最低限度．相反，观察者能够对他所关心的現象施展巨大影响．虽然我十分尊敬我的那些人类学家朋友的智慧、本領和誠实目的，但是我并不認为他們所考查的任何社会以后将永远不变．許多教会人士在給原始語言写成文字的过程中，把語言誤解成永久的法律．一个民族的社会习惯可以仅仅因为对它进行調查工作而消失或发生变化．在另一种意义上，这就是常說的"翻譯者是叛逆者"的意思．

另一方面，社会科学家沒有从永恆的、与时間地点无关的角度来冷静观察他的科目的那种便利．也許有一种人类微生物的羣众社会学，这門科学观察人类就象观察瓶子里的果蝇一般；但这不是我們这些人类微生物所特別关心的社会学．我們对人类在永恆相之下（sub specie aeternitatis）的兴亡苦乐很难有动于衷．人类学家所报告的习俗，是那些寿命同他自己一般长的人們的习俗（这些习俗是和那些人的生活、教育、事业和死亡牵連着的）．經济学家最关心的是預測几十年以內产生的或是至少对一个在他事业的各个阶段中起影响的那种商业周期．現在很少有政治哲学家会把他的研究局限在柏拉图的理念世界中．

換句話說，我們在社会科学中不得不考虑一些短期的統計游程，我們也沒有把握断定我們見到的大部分东西是不是我們自己創造的膺品．对股票市場的研究很可能把股票市場弄糟．我們不能成为好的研究者，因为我們同我們的研究对象太一鼻孔出气了．总之，不管我們在社会科学中的研究是統計性的或是动力学性質的——这种研究一定具有两可的性質，它們可信的程度只能够到达头几位数字，一句話，它們不能給我們提供大量的可以驗証的、有意义的信息，如同我們在自然科学中可以希望得到的那种信息

一样. 我們不能忽視这些信息, 但我們对这些信息的可靠性不要抱着过大的希望. 不管我們愿意与否, 有許多东西我們只好让熟練的历史学家用不"科学"的、叙述的方法去进行研究.

附　　註

有一个問題应該包括在这章之內,虽然它并不是議論的重点. 这个問題就是能不能制造一部下象棋的机器, 对于机器和心灵来說这种能力是否具有本质的差別. 我們不必提出这样的問題: 能不能制造一部能下馮·諾意曼所說的最优棋局的机器. 就是最好的人脑也无法做到这一点. 但是另一方面, 无疑地可以制造那样一种机器,不管下得好下得坏,它总是按着規則来下棋. 制造这种机器根本上不比制造鉄路信号塔上的連动信号系統更为困难. 我們現在要制造的是介乎两者之間的东西: 我們要制造的机器将是人的有趣的对手,它下的棋有一定的水平,同人类棋手的水平相彷彿.

我認为可以制造一部比較粗糙但决不平凡的机器来实現这一目的. 机器在下棋时必須認眞比較——如果可能, 要极迅速——自己在两三步內所有可能的走法和对方在两三步內全部可能的还击. 每一种走法的結果都应当給以一定的評价. 例如, 一种走法能将死对方,得最高的評价,被对方将死,得最低評价;失子、得子、将軍以及其他可以見到的情况都应該給一定評价, 而且这种評价要同优秀棋手所給的評价相差不太远. 每种走法的第一步, 可以按照馮·諾意曼的理論給予評价. 当只考虑到机器走一步和对方走一步的所有走法时,机器对每一种走法的評价,应該根据对手在机器走了那一步之后,作出各种可能的还击所造成的不同局势中,使机器获得最小評价的那个局势来評价[1]. 当考虑到机器走两步和对手走两步的所有走法时,机器对每一种走法的第一步的評价,应該根据对手所有可能的第一次回击中, 使机器获得最小評价的那

1) 使机器获得最小評价的局势就是对机器最不利的局势.——汉譯者注.

个局势来評价，而对手的所有可能的第一次回击，却是根据机器走第二步时的最高評价来确定的，这个对机器的最高評价指的是假定当对方只走一步，机器跟着也只走一步时，机器可能获得的最高評价[1]．这一方法也可以用于双方走三步或更多步数的情况．这样，机器就从 n 步中挑选出具有最高評价的那一种走法，n 的値是由机器設計者决定的．因此，它的下法是一定的．

这样的机器不但会按規則下棋，而且还不至于下得可笑地坏．在每一阶段上，如果两三步內就可以把对方将死，机器就会这样做；如果可以避免两三步內被对方将死，机器也会設法避免．它大概会战败一个愚蠢而粗心的棋手，但是同一个技巧很高的仔細的棋手去下棋，它一定要輸．換句話說，它可能下得同人类中絕大多数棋手一样好．这幷不是說它会灵巧得同买厄塞耳(Maelzel)的謊騙机器一样，但是不管怎样，它可以得到很大的成就．

1) 对手在作第一次回击时，他会考虑到机器跟着还要走一步，而且可能会选择对机器最有利的一步走．——汉譯者注．

第二部分

补充的几章

1961

第 九 章

关于学习和自生殖机

学习的能力和生殖自己的能力是我們公認的作为生命系統的特征的两种現象．这些能力的性質表面看来虽然不同，相互之間却有密切关系．一个动物进行学习，那它就是一个能够被它过去的环境轉变成另一个不同的动物的动物，因而它在自己个体生活的时間內对周围环境的影响是可調节的．一个动物进行繁殖，就是它能够产生出另一些虽然不是和它完全相同，至少是近似相同的动物，所謂近似相同，就是在时間的进程中不是不能发生任何改变．如果这种改变本身是能遺传的，我們就有了供自然选择发生作用的原始材料．如果行为方式有遺传不变性，那末在各种有了变异的行为类型中，那些被传播开的行为方式，总可以发現它們对于种族的継續生存有某些好处，因而能使自己稳定下来，另外一些对种族的継續生存有害的行为方式也就会被消灭．与个体的个体发育的学习比較，上述結果就是某种种族的或系統发育的学习．个体发育和系統发育的学习都是动物根据周围环境来調节自己的方式．

个体发育和系統发育的学习，特别是后者，不只是适用于所有的动物，而且适用于植物，适用于所有从任何意义上看来是有生命的有机物．当然，这两种形式的学习对于不同种类的有生命体的重要程度是有很大不同的．对于人，在一定范围內对于其他哺乳动物，个体发育的学习和个体适应性被提到最高的重要地位．的确可以这样說：人的系統发育学习的大部分都是用来建立良好的个体发育学习的可能性．

朱利安·赫胥黎（Julian Huxley）在他的論鳥的智力的主要論

文[1]中曾經指出，鳥的个体发育的学习能力很小．昆虫的情况与鳥有某些类似．在个体对飞行的迫切需要和由此引起的可以用来作个体发育学习的神經系統被这种需要所事先占据，这一事实，可能是鳥和昆虫个体发育的学习能力小的原因．鳥的飞行、求爱、撫养小鳥、筑巢等复杂行为，都是在很早的时候，未經母鳥什么教育的情况下，就能正确的做到的．

本书也应有一章对下面两个彼此有关的問題加以适当討論．人造的机器能学习嗎？它們能生殖出自己嗎？在这一章中，我将試着証明，它們确实能够学习和生殖自己，我将对这两种活动所需的技术加以說明．

这两个过程中，学习比較簡单些，因此，关于学习过程的技术的发展也走在前面一些．我要在这里特别談到博奕机的学习，这种博奕机能使自己根据經驗改进自己行为的战略和战术．

已經有了一种現存的博奕理論——馮·諾依曼理論[2]．这个理論涉及的与其說是一种从博奕的开始看来为最好的对策，不如說是一种从博奕的結局看来为最好的对策．在博奕的最后一着中，如果有可能，一个博奕参加者总是力求走能获胜的一着，其次至少要走能得平局的一着．他的对方，在走他这一着的前面一着时，总是力求要取一种着法，使得他不能走这获胜或得平局的一着．如果他这时能走出获胜的一着，他就一定会这样走下去，这一着就不会是博奕的倒数第二着，而是博奕的最后一着了．另一方在走这一着的再前面一着时，他将打算采取这样一种走法，使得对方即使有最好的智謀，也不能阻止他走最后取胜的一着，如此依次倒着推下去，都是如此．

象井字遊戏(ticktacktoe)这类整个战略都是已知的博奕，就可

---

1) Huxley, J., Evolution: *The Modern Synthesis*, Harper Bros., New York, 1943.

2) Von Neumann, J., and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, Princeton, N. J., 1944 (中譯本，科学出版社将出版)．

以从最开始就按照这种对策来走. 当这种对策行得通时，很明显它是进行博奕的最好的方法. 但是，在象象棋这样的許多博奕中，我們的知識不够，不允許我們对这类博奕形成一个完整的战略，这样我們只能对完整的战略加以近似. 馮·諾依曼类型的近似理論假定博奕参加者的对方是完全聰明的那种博奕能手，这种理論令博奕参加者以极度的謹愼行动.

对待博奕的这种态度并不經常都是恰当的. 在作为博奕的一种的战爭中，这种态度一般将造成一行动上的优柔寡断，其結果，經常总是不会比失敗好多少. 让我举出两个历史上的例子. 当拿破仑在意大利和奥地利人打仗时，他之所以有威力，部分因为他知道奥地利式的軍事思想是气魄狭小和因循守旧的，因此他十分正确的假定他們不可能利用法国革命的士兵所发展出来的新的"果断逼人"(decision-compelling)的战爭方法. 当納尔逊[1]与大陆欧洲的联合舰队作战时，他就是靠一种机器軍舰来取胜的，这种机器軍舰使他掌握数年的制海权而且由此发展出各种思想方法，他清楚地知道这些方法是他的敌人所不能利用的. 如果他不充分利用这种有利因素，而是按照他面对的敌人也有同等的海軍經驗的假定那样来小心地行动，在长期作战之后他也可以获胜，但是却不可能象他那样快地，那样彻底地获胜，他就不可能去組織那严密的舰队封鎖，使得拿破仑最后失敗. 在这两个例子中，支配的因素是指揮官和他的对方从他們行动的过去中統計地表現出来的已有作战記录，而不是那种要和一个全能的敌人打一場全能的仗的意图. 在这些情况下，对馮·諾意曼博奕論方法的任何直接应用都将被証明是无益的.

对于同一个問題，一些关于棋术理論的书却不是按馮·諾意曼的观点来写的. 这些棋书是棋手和另一些質量很高、知識很广的棋手下棋的实际經驗的原則总結；他們对每一个棋子的損失，对移子(mobility)，控子(command)，加子(development)和其他可以随

1) 納尔逊 (Haratio Nelson, 1758—1805)，英国名将，Trafalgar 海战的胜利者. ——譯者注.

博奕进程而起变化的因素都給予某种估价或权重.

要制造一部能下一种棋的机器并不是很困难的. 非常簡单的計算机就能輕易使机器遵守博奕的規則，只走符合規則的步着. 改装一部数字机来达到这个目的确实不困难.

現在来討論符合博奕規則的对策問題. 对于各个子、对于控子、移子等等的估价，本质上都能够化为数值項，这样做了之后，棋书上的原理就可以用来决定每一局棋的最好着法. 这样的机器已經制造出来，它們可以滿有把握地和业余棋手比賽，虽然目前还不能达到名手的才干.

設想一下你和这样一部机器下棋时的处境. 为了使双方的地位公平，让我們假定你是在进行通信下棋，但是并不知道和你通信下棋的是一部机器，因此，也沒有由于知道对方是机器而可能引起的各种偏見. 自然，象通常下棋的情况一样，你会去判断你的对方的棋性. 你会发現当在棋盘上两次出現同一棋势时，你的对方的动作每次都一样，你会发現他的棋性是很死的. 如果你有什么花招要耍，在相同的条件下，你总可以这样去耍. 因此，对于一个专家来說，要找出他的机器对方的棋路而且每次都把他打敗，是并不太难的.

但是，有一些机器并不能这样容易地被击敗. 让我們假定在每下了几盘棋后，机器都要求暫停而利用它的設备去作其它目的的工作. 在暫停的时間內，它不去和对方下棋，而是对所有記录在它的記忆装置上的前面几局棋的情况进行审查，以便确定对各个子，对控子和移子等等的不同估値給予什么权重，才能最有利于取胜. 这样，机器就不但从自己的失敗中学习而且从对方的胜利中学习. 現在它用新的一套权重值代替老的一套并作为一部新的更好的机器来継續进行博奕. 这样的机器就不再是一部死棋性的机器，一次可以取胜它的花招，最后总归要失效. 不但如此，它还可以在时間的进程中吸收对方的某些对策.

在象棋中，所有这些做起来是非常困难的，事实上这种技术还沒有充分发展到能使一部机器下大象棋的地步. 西洋象棋

(checker)的問題比較簡单一些. 各个子的数值的同一性,大大減少了必須考慮的組合数. 而且,部分地由于这种同一性,西洋象棋比象棋可分成的阶段数要少得多. 就是在西洋象棋中,結束博奕的主要問題也不是得子,而是与敌方建立一种关系,使得子成为可能. 同样,对象棋步着的估值,必須使它与不同的阶段无关. 不但是博奕的最后阶段在走法上与中間阶段有所不同(这一点当然是最重要的),而且开始阶段較之中間阶段在走法上也有所不同, 开始阶段的走法要更多地考慮到如何把子摆在一个便于进攻和防御的地位. 因此,我們决不能滿足于对整个博奕的各种权重因子給予均一的評价, 必須把学习的过程分成几个不同的阶段. 只有这样我們才有希望制造出一部能下大象棋(master chess)的机器.

一級程序設計(在某些情况下它是綫性的)与二級程序設計(它在决定如何实現一級程序中要求实現的对策时,利用很长一段过去的数据)相結合的概念,本书早已联系着預測問題討論过. 預測器靠着一种綫性运算用飞机飞行的刚刚过去的状态去預測飞机未来的飞行状态; 但是确定一个正确的綫性运算的問題是一个統計問題, 过去长期飞行的状态和許多次同类飞行的过去状态是解决这个問題的統計上的根据.

为了确定从短期过去看来要采取的策略, 需要有对长期过去的統計研究,这种統計研究是显著地非綫性的. 事实上,在应用維納-霍普夫(Wiener-Hopf)預測方程[1]时,这个方程的系数是用一种非綫性的方法来确定的. 学习机一般总是靠非綫性反饋来运轉. 薩美埃尔[2]和瓦塔那比[3]所說的下西洋象棋的机器,在按程序运轉了 10 到 20 小时的基础上, 能滿有把握地学会击敗設計它的

1) Wiener, N., *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications*, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons, New York, 1949.

2) Samnel, A. L., "Some Studies in Machine Learning, Using the Game of Checkers", *IBM Journal of Research and Development*, 3, 210—229(1959).

3) Watanabe, S., "Information Theoretical Analysis of Mulivariate Correlation", *IBM Journal of Research and Develoòment* 4, 66—82 (1960).

人.

瓦塔那比关于应用程序設計机的哲学思想是很激动人的. 他把寻找一种最适合某种巧妙和簡单准則的証明初等几何定理的方法,看成是学习一种博奕,这种博奕的对手不是个别的人,而是我們称之为"妖魔上校"(Colonel Bogey)的东西. 当我們要在經济、直观和其它价值的基础上,用确定一定数目的未定参数的值的方法,來建立一个准美学(quasi-aesthetic)式的理論时,我們就是在用邏輯推理玩一种瓦塔那比所研究的那类博奕. 的确,这种博奕只是一种有限的邏輯推理,但它却是值得去研究的.

許多形式的斗爭活动,我們通常不把它們看作是博奕,但是,通过博奕机理論却有力地說明它們具有博奕的性質. 猫鼬与蛇之間的搏斗就是一个有趣的例子. 如刻卜林(Kipling)在"Rikki-Tikki-Tavi"中所指出的,虽然猫鼬皮肤上的硬毛使蛇很难咬进它,因而多少可以起一些保护的作用,但是,猫鼬对于眼鏡蛇的蛇毒并沒有免疫的能力. 如刻卜林所說的,这种搏斗是一种死神之舞,一种力气和敏捷的竞爭. 沒有理由認为猫鼬的个別动作比眼鏡蛇快些或准确些. 然而猫鼬通常是杀死眼鏡蛇而自己并不受伤. 怎么能够做到这一点呢?

我看見过这样一次搏斗,也从电影中看到过类似的搏斗,我在这里对它作出一种我認为是有根据的解释. 我不能担保我的观察也象我的解释那样正确. 猫鼬开始用一种佯攻来挑起蛇对它的进攻. 猫鼬閃避和作其它伪装的动作,这样我們就看到在两个动物的双方都作一种有节奏的动作. 无論如何,这种舞蹈不是靜态的而是逐漸发展的. 当舞蹈継續下去,針对眼鏡蛇的进攻,猫鼬的伪装动作出現得越来越早,等到眼鏡蛇的身子伸长了,不能迅速动作了,猫鼬就眞正发动最后的攻击. 这时,猫鼬的进攻就不是一种佯攻,而是对准眼鏡蛇的头,致命地咬一口.

換句話說,蛇的行动方式只限于簡单地冲击,每一次冲击都是为冲击而冲击;而猫鼬的行动方式則考慮到搏斗的整个过去的一段,如果不是很长的一段,至少是它能够估計的一段. 猫鼬的活动

有几分象学习机，它的真正致命的攻击是由那高度地組織起来的神經系統来决定的.

正如华尔脱·狄司耐(Walt Disney)几年前的一部影片中所表現的，当一只西方鳥攻击一条响尾蛇时，也发生非常类似的情况.鳥用嘴和爪子搏斗和猫鼬用牙齿来搏斗，它們在活动的型式上是很相象的.斗牛也是属于这方面的很好的例子. 請記住，斗牛并不是一种运动，而是一場表演牛和人的美感和相互协調的动作的死神之舞. 性情平靜的牛本来不会进行这种搏斗的，从我們的观点看来，我們可以不去考虑对牛的最初的鞭策，这种鞭策的目的是要使竞賽双方的交战能力都得到最高度的发展. 有修养的斗牛士有很多套动作，例如炫耀他的披肩，各种佯攻，繞足趾旋轉等等，这些动作都是为了使牛耗尽它的冲劲并且在斗牛士准备把 estoque 刺入牛的心脏的那一时刻，使牛处于松弛的状态.

我所說的关于猫鼬和眼鏡蛇，斗牛士和牛之間的搏斗同样适用于人与人之間的体力竞賽. 我們来看看一場用短剑的决斗. 它包括一連串的佯攻、閃避和冲刺，双方的目的都是为了把对方的剑引出某条綫以外，以致他能刺中对方而又不因双方的接近而把自己暴露在对方面前. 再有，在一場网球选手賽中，每一次只考虑如何送这一次的球或回这一次的球是不够的，較好的战略是迫使对手在一連串的回球中逐渐处于一种劣势，直到他无法再完全的回球.

这些体力竞賽和我們打算让博奕机去玩的那类博奕都有同样的学习因素，这种学习因素表現为对对手的习惯和自己的习惯的認識. 对于体力竞賽上适用的东西同样适用于智力因素較強的那些竞賽，例如在战爭和模拟战爭的遊戏中，指揮部就是靠軍事經驗的因素来取胜的. 这对于古典的陆战和海战是如此，对于現代的还沒有进行过的原子武器的战爭同样是如此. 象用学习机使下西洋象棋(checker)机械化一样，对于所有这些战爭的指揮也可能做到某种程度的机械化.

沒有比想到第三次世界大战更可怕的了. 是否有一部分危險

真正来自对学习机的濫用，是值得深思的．我一再听到有人說，学习机不会为我們造成任何新的危险，因为当我們感到有危险时，可以把它关掉　我們究竟能不能关掉它呢？ 要有效地关掉一部机器，我們必須得到是否到了危险点的情报． 事实上我們制造的机器并不能保証我們要关机器时获得相应的情报．这一点在談到下棋机运轉了很有限的一段时間后，就能打敗它的設計人时，就已經令人信服了．况且近代数字机的极快的运轉速度已經超出我們对危险指标及时作出考虑的能力范围．

关于具有很大威力和完成某种对策的巨大能力的机器，关于这种机器的危险性的思想，不是什么新东西． 新东西是我們已經有了这类有效力的机器．在过去，类似的可能性被認为是魔法，成为各种传奇和民間故事的題目．这些故事彻底地探討了魔术师的道德地位． 我在一本較早出版的"人应該象人那样来使用"[1]的书中已經討論过传奇中的魔术道德的某些方面．我要重复一下在該书中討論过的某些材料，为的是在学习机的新成就上，更精确地說明它．

一个最有名的魔术故事就是哥德的"魔术师的徒弟"．故事中說，魔术师离开了他的徒弟、仆人和打水的零工．零工是一个懶惰而有发明才干的小孩，他把他的打水的工作交給一把扫帚，对着扫帚他喊出从主人那里听来的魔术的約言． 扫帚殷勤地为他工作，毫不停止．小孩快要淹死了． 他发覚他沒有学会，或者是忘記了叫扫帚停下来的第二句呪語．在絕望中，他拿起扫帚，用他的膝盖把它折断，使他惊慌的是，扫帚的两半継續在打水．幸好在他沒被完全淹死以前，主人回来了，主人唸出呪語叫停住扫帚并且給他的徒弟一頓严厉的責駡．

另一个故事是"天方夜談"中的漁人和妖魔．漁人在他的网中打上来一个封漆上盖有梭罗門印章的瓶子． 在这个瓶子中，梭罗

1) Wiener, N., *The Human use of Human Beings*, Cybernetics and Society, Houghton Mifflin Company, Boston, 1950.

門囚禁了一个反叛的妖魔. 妖魔出現在一片烟雾中,这个巨大的家伙告訴漁人說,在他被囚禁的头几年,他曾决定要以权力和幸福报答他的拯救者,現在他却决定要用手杀死漁人. 幸好漁人找到了一个方法把妖魔裝回瓶里并把它投进海底.

比这两个故事更可怕的是本世紀初英国作家賈可布斯(W. W. Jacobs)写的猴掌的寓言. 一个退休的英国工人与他的妻子和朋友,一位从印度来的英国少校軍官,閑坐在家. 少校軍官給他的主人看一个样子象枯干的猴掌的护身符. 这是一个印度圣徒送給他的,圣徒打算滿足三个人中每一个人三个愿望,以此来說明向命运挑战是愚蠢的. 軍人說他不知道第一个所有者的头两个愿望,只知最后一个愿望是死. 他告訴他的朋友,他自己是第二个所有者,但是不愿說出他自己的恐怖經驗. 他把猴掌投入火中,但是他的朋友又把它取回并且打算試一試它的威力. 退休工人的第一个愿望是要200英磅. 不久之后,有人敲門,僱他儿子的那家公司的一个职員走进屋来. 父亲明白了他儿子已經被机器軋死,公司虽然不承認負有什么責任和法律上的义务,但是愿意付給死者的父亲数目为200英磅的撫恤金. 受悲伤打击的父亲提出了他的第二个愿望——让他儿子回来——当有第二次敲門声而門被打开时,出現了一个东西,不用多說,这就是他儿子的亡魂. 他的最后一个愿望就是让亡魂走开.

在所有这些故事中,魔术的动作机构都是木头脑瓜式的,如果我們求它造福,那我們就問它要我們眞正需要的东西,而不要問他要那自以为需要的东西. 学习机的新的眞正的动作机构也是木头脑瓜式的. 如果我們为贏得战爭而設計一部机器,我們就应該想好我們所指的胜利是什么意思. 打一場不引起直接灾难的核战爭的唯一經驗只是由模拟战爭的游戏得来的. 如果我們用这种經驗作为实际的意外事件中的行动指南,我們在博奕設計中用到的胜利的价值就必須是我們所知道的在一場战爭的实际結果中的那同一价值. 我們只有在直接的,巨大的,难挽回的危险中才能知道这种价值. 我們不能希望机器在偏見和感情的妥协方面也跟我們一

样，由于这种感情的妥协，我們可以自己把毁灭叫作胜利。如果我們追求胜利，但是并不知道我們所要的胜利是什么意思，我們将会发現鬼魂在敲我們的門。

关于学习机談得很多了。现在让我对自生殖机說一两句話。这里机器和自生殖两个詞都是重要的。机器不只是物质的一种形式，而是为完成某确定目的的一种动作机构。自生殖也不仅是生产出一个捉摸得到的复制品，而是要生产出一个具有同样功能的复制品。

这里有两个不同的論点需要証明。其中之一純粹是結构上的，涉及的問題是：机器能否有足够的部件和充分的复杂結构来实現它的功能中的自生殖功能。这个問題已故的約翰·馮·諾依曼已經作了肯定的回答。另一个問題涉及到制造自生殖机的实际操作程序。在这里我的注意力将限于一类虽不包括所有机器，但具有很大普遍性的机器。我指的是非綫性变换器。

这种机器是一种輸入为一簡单时間函数，輸出为另一时間函数的装置。它的輸出是由輸入的过去完全地决定的，但是，一般說来，輸入增加，輸出并不成比例地增加。这样的一部装置就叫做变换器。所有綫性和非綫性变换器的一个共同性质就是对时間的平移的不变性。如果一部机器在执行某种功能，那末，把輸入的时間向后移动某一时間，輸出也就被移后同一时間。

非綫性变换器的正則表示式是我們的自生殖机理論的基础。对于綫性装置十分重要的阻抗和导納的概念，在这里是完全不适用的。我們将提出实現这种表示的某些新方法，这就是部分由我[1]发展，部分由伦敦大学丹尼斯·格博教授[2]发展的方法。

格博教授的方法和我的方法都引导到非綫性变换器的制造，这种非綫性变换器綫性到这样的程度，以致它能用一个輸出来表

1) Wiener, N., *Nonlinear Problems in Random Theory*, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1958.

2) Gabor, D., "Electronic Inventions and Their Impact on Civilization", *Inaugural Lectures*, March 3, 1959, Imperial College of Science and Technology, University of London, England.

示，这个輸出是一組具有相同輸入的非綫性变換器的諸輸出的和．这些輸出带上它們的可变的綫性系数被加在一起．这使我們在設計和說明非綫性变換器时能够应用綫性展开理論． 特别是，这种方法允許我們用最小乘方法来得到各組成項的系数．如果在这种方法中加上另一个方法，即对該装置的所有輸入的集合的統計平均，我們就得到正交展开理論中一个不同的分支． 非綫性变換器理論的統計根据，可以从对每一特定情况下諸輸入的过去統計的实际研究中得到．

这是关于格博教授的方法的粗略說明，至于我的方法基本上类似，只是我的研究的統計根据稍有不同．

大家都知道电流幷不是連續地被传导的，而是由一束在均匀度上有統計变化的电子流来传导．这种統計上的起伏可以由布朗运动理論，或者由散粒效应和眞空管噪声等类似理論很好地加以表示．关于这些問題，我将在下一章中作某些討論． 能发生具有特定統計分布的、标准化的、散粒效应的装置无論如何是能制造出来的，这样的装置已經作为商品而在生产了．請注意，眞空管噪声某种意义上可說是一种万全的輸入，因为在一段足够长的时間內，它的起伏迟早总可以去近似任何給定的曲綫．眞空管噪声的积分和平均值理論是非常簡单的．

利用眞空管噪声，我們很容易确定一个正規和正交的非綫性运算的閉集．如果接受这些运算的輸入有与眞空管噪声相当的統計分布，那末，我們的装置的两个組成部件的輸出的乘积的平均值（对眞空管噪声的統計分布所取的平均）将为零．而且每一部件的輸出的均方值都能被規格化为1．于是应用大家熟习的正交函数理論就可以把一般的非綫性变換器表成这些組成部件的展开式．

特别是我們的装置的各个部件的輸出是厄米特多項式的乘积，这个多項式以輸入的过去作它的拉格里系数（Lagueree coefficients）． 这些在我的随机理論中的非綫性問題一书有詳細的介紹．

自然，要对一組所有可能的輸入取平均值，初看起来，是困难

的．这个困难所以能解决是由于散粒效应輸入具有测度可迁性，或各态历經性．任何可积函数，其参数具有散粒效应輸入的分布，它对时間的平均，几乎每一次都是等于它对系綜的平均．这就允許我們把装置上的两个部件加上同一散粒效应輸入，并且用对时間取平均值代替对整个系統取平均值来求得两部件的輸出的乘积的平均值．所有这些步驟所需的运算項目并沒有超过两个电势相加，相乘和对时間取平均值的范围．能作这些运算的机器都是現存的．事实上，格博教授的实驗方法所用的基本仪器与我所用的是相同的．他的一个学生发明了一种特别有效和經济的乘法机器，这种机器依靠两个磁場綫圈的吸引使一个晶体产生压电效应．

总起来說就是，我們能够用許多綫性項的和来模拟任何未知的非綫性变换器，其中每一个綫性項都有固定的特性并带上一个可調整的系数．当同一散粒效应发生器同时联接在那未知变换器和一特定的已知变换器的輸入端时，那特定的已知变换器所带的那个系数能够由这两个变换器的乘积的平均值来确定．再有，如果用使各系数自动地轉送到反饋装置上去的办法来代替前面这个办法——在一个仪器的刻度上数出結果，然后用手把結果送到一个变换器上，以此得到要模拟的装置的一个模拟部件——并沒有什么特别的困难．我們已經成功地做到的是：制造一个能模拟任何非綫性变换器的特性的白箱，然后把它与一給定的黑箱变换器进行类比，方法是給两者加上同一随机輸入并把它們的輸出以适当方式联接起来，使它們不需要人的干預就能达到一种适当的結合．

請問这个过程，与另一些过程——基因作为一个样板，从氨基酸和核酸的一种比例不定的混合物中，形成与它相同的另一些基因分子，或者，病毒把从它的寄主的組織和体液中形成的其它同种病毒分子引变成自己那种类型——从哲学观点看来是否有很大的不同．我并不完全指望这些过程在細节上也是相同的，但是我却相信从哲学的观点看来，它們是非常类似的現象．

第 十 章

脑电波与自行組織系統

在前一章中，我討論了学习和自生殖問題，它們既适用于机器也适用于生物系統，至少近似地适用于生物系統. 我在这里还要重复我在序言中提出的某些論点并且把它們直接加以应用. 如我所指出的，这两种現象是相互密切关联的，因为头一个現象是个体依靠經驗去适应周围环境的基础，我們叫它为个体发育的学习，第二个現象提供变异和自然选择借以起作用的材料，它是系統发育的学习的基础. 我曾經講过，哺乳动物，特别是人，主要是通过个体发育学习来調节他們与周围环境的关系，至于行为方式有很大不同的鳥，在它的个体生命中不进行什么学习，更多地是靠系統发育学习.

我們已經知道非綫性反饋在这两种过程的起源上非常重要. 現在这一章要专門研究非綫性現象在其中起主要作用的一种特殊的自行組織系統. 我在这里所說的就是我認为发生在脑动电流图或脑电波的自行組織中的东西.

在我們討論这些問題的思想內容之前，我必須說說什么是脑电波？它們从精确的数学处理的角度看来具有怎样的結构？很多年以前就已經知道，有某种电势伴随神經系統的活动而产生. 在这个領域中的第一次观察要追溯到上世紀初，这个观察是由伏特(Volta)和加万里(Galvani)在蛙腿的神經肌肉标本上完成的. 这就产生了电生理科学. 然而，这門科学直到本世紀头二十五年以前，还是进展很慢的.

为什么生理学的这一分枝发展得如此的慢，这是值得反省的. 用来研究生理电势的原始仪器就是电流計. 这些电流計有两个缺

点．第一，从神經本身得来的，用以推动电流計的綫圈或指針的整个能量是太小了． 第二个困难，那个时候的电流計的运动部件有很大的慣性，为了使指針停在它准确的位置，需要一个很大的回复力．也就是説，电流計实际上不只是一只記录器，而且是一只畸变計．早期最好的生理电流計是爱因沙文（Einthoven）的弦綫电流計，它的运动部件簡化到只是一根綫．在当时的标准看来，如此精細的这种仪器，要不产生严重畸变地記录下小的电势还是不够的．

于是电生理学期待着一种新的技术．这种技术是属于电子学方面的，它們有两种形式． 其中之一建立在爱迪生发現的关于气体导电的某些現象的基础上，这些发現引起了眞空管和放大用电子管的应用．这些管子使我們能够把一个弱电势很忠实地变換为強电势．因此，也就使我們能够用一种不是由神經发出的，而是由它控制的能量，来推动記录装置的最后的元件．

第二个发明也与眞空中的导电有关，它叫做阴极綫示波器．这使我們能够用一种比以前任何的电流計要輕得多的东西作为仪器的运动部件，这个东西就是一束电子．借助于这两种装置（分别地或結合起来用），本世紀的生理学已經能够很忠实地跟踪一个小电势的时間序列，而这在十九世紀是完全超出了仪器正确工作的范围的．

有了这些工具我們就能得到微弱电势的时間序列的正确記录，这些微弱电势是插在头皮上的或植入大脑中的两个电极之間的电势． 这些电势在十九世紀都曾經观察过，新的正确記录的威力激起了二十或三十年前的生理学家的巨大希望．至于把这种仪器用来直接研究大脑的活动的領袖人物，在德国有柏尔格尔（Berger），在英国有安德連（Adrian）和馬修斯（Matthews），在美国有杰斯柏（Jasper），戴維斯（Davis）和吉卜斯（Gibs）夫妇．

必須承認脑电流描記术的近期发展直到現在还不能滿足这个領域的早期工作者的宏愿．他們那时得到的数据是由印字机記录下来的．它們是一种非常复杂和不規則的曲綫；虽然可以辨認出某些占优势的頻率（例如每秒振蕩約 10 次的 α 律），但是这印字机

的記录是一种不适合于作进一步数学处理的記录形式. 結果是脑电流描記术成为一种技术而不是一門科学，它依賴于受过訓練的觀察者在大量經驗的基础上辨認印字記录的某些性質的能力. 这就是那反对对脑动电流图所作的解释的最基本的理由.

在近二三十年間，我对連續过程的調和分析发生了兴趣. 当物理学家早已考虑过这样的过程时，調和分析方面的数学家几乎都还局限在研究周期过程，或当时間从正方向或負方向前进时在某种意义上漸趋于零的那种过程. 在把連續过程的調和分析放在一个巩固的数学基础方面，我的工作要算是最早的嘗試. 我发現这方面最基本的概念就是自相关的概念，它已經由泰洛（G. I. Talor，現在叫 Sir Geoffrey Taylor）在研究湍流[1]时用到过.

时間函数 $f(t)$ 的自相关由 $f(t+\tau)$ 与 $f(t)$ 的乘积的时間平均来表示. 作自相关的表示式时，即使在所研究的实际情况中，我們遇到的是实变数函数，引用时間的复变数函数仍然較为方便. 这时自相关就变成 $f(t+\tau)$ 与 $f(t)$ 的共軛函数的乘积的平均值. 不論我們使用的是实函数或复函数，$f(t)$的功率譜都是由自相关的富氏变換得到的.

我已經提到印字机記录不适于作进一步的数学处理. 要自相关的概念能发揮很大作用，必須用另一种較适于仪器工作的記录方法.

記录微小电势起伏，以便作进一步处理的最好途径之一是应用磁带. 它能把电势的起伏以一种永久的形式貯存起来，以便在以后任何需要的时候加以利用. 麻省理工学院电子学研究室十年前就已經在罗逊布里斯（Walter A. Rosenblith）教授和布拉杰尔（Mary A. B. Brazier）博士[2]的指导下設計出这样一种仪器.

在这种装置中，磁带以調頻的形式加以利用. 原因是讀出磁

1) Taylor, G. I., "Diffusion by Continuous Movements", *Proceedings of the London Mathematical Society*, Ser. 2, **20**, 196—212 (1912—1922).

2) Barlow, J. S., and R. M. Brown, *An Analog Correlator System for Brain Potentials*, Technical Report 300, Research Laboratory of Electronics, M.I.T., Cambridge, Mass. (1955).

带时往往会抹掉原記录的某些部分. 如果用調幅的磁带，記录被抹掉一些就会引起所載消息的改变，因而在下一次再讀磁带时，我們实际讀到的会是一种改变了的消息.

用調頻的方法虽然也有記录被抹掉一些的問題，但是我們讀磁带的仪器对于振幅的变化是不敏感的，它讀到的只是頻率. 直到磁带被抹損到完全不能訊讀以前，对磁带的部分抹損都不会使所載的消息产生很大的畸变. 磁带能讀很多遍，其正确性与第一次讀它时几乎相同.

从自相关的性質可以看出，我們需要的工具是一种能把对磁带的訊讀延后某一可調节的时間的机器. 如果把一部仪器的两个探头一个跟一个地放在一时間間隔为 A 的磁带記录上，就有两个信号发出来，它們之間除了在时間上的相对位移动外，其它都是相同的. 时間移动的大小决定于两个探头間的距离和磁带的速度，它們都是能随意改变的. 我們可以把一个叫 $f(t)$，另一个叫 $f(t+\tau)$，而 τ 就是时間移动. 两者的乘积可以通过例如平方定理整流器(square-law rectifier)和綫性攪伴器(linear mixer)，利用恆等式

$$4ab=(a+b)^2-(a-b)^2 \qquad (10.01)$$

来得到. 这个乘积可以用一个时間常数比試样的时間間隔 A 要长很多的电阻-电容器网絡的积分运算近似地加以平均. 所得的平均值与有 τ 延后的自相关函数的值成比例. 对不同的 τ 值作重复的处理就得到一組自相关值[或者叫作：对一个长时間基 A (large time base A)的抽样自相关 (sampled autocorrelation)]. 下图 9 是一条属于这类实自相关(actual autocorrelation)的曲綫[1]. 請注意我們只給出了曲綫的一半，因为对負时間的自相关与对正时間的相同，至少当我們要求其自相关的那根曲綫是实曲綫时，正負时間的自相关是相同的.

类似的自相关曲綫在光学中已經用了多年了，光学中得到自

1) 这个工作是与麻省省立医院神經生理实驗室和麻省理工学院通信生物物理(The Communications Biophysics)实驗室合作进行的.

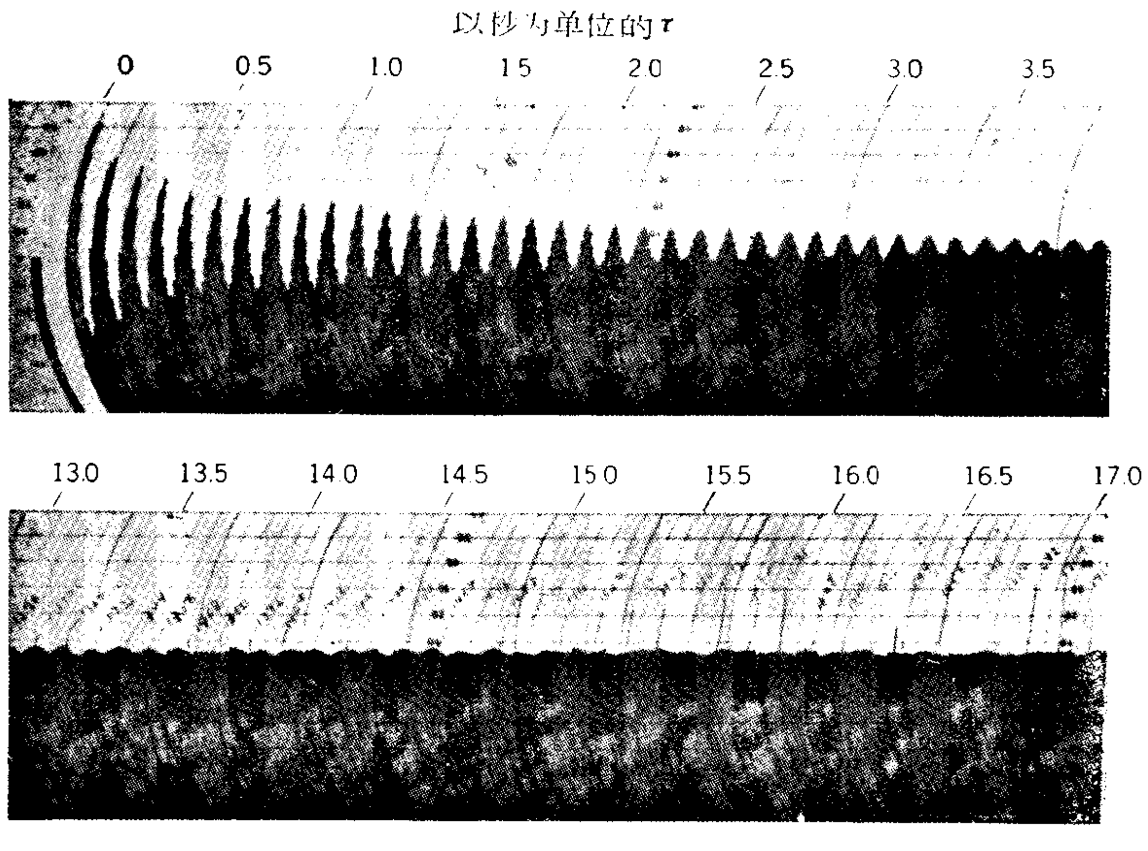


图 9　自相关

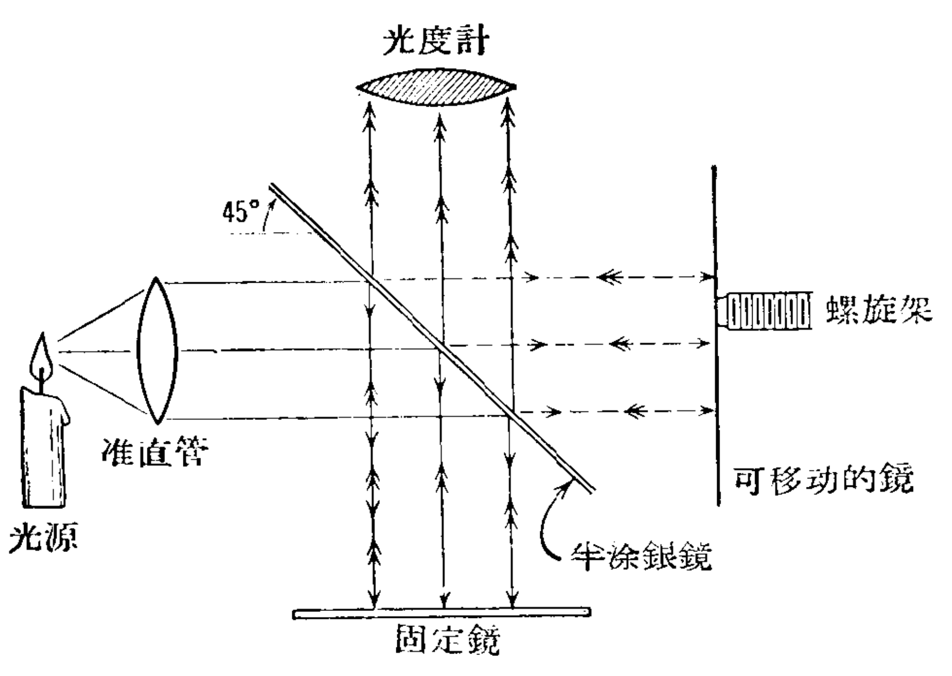


图 10　迈克耳逊干涉仪

相关曲綫的仪器就是迈克耳逊干涉仪（图10）。 利用一个反射鏡和透鏡的系統，迈克耳逊干涉仪把一束光分成两部分，使它們走不

間长度的路程，然后再把它們合成为一束光．不同的路程长度产生不同的时間延后，合成的光束是进入光束的两个复制品（它們又可以再次表示为 $f(t)$ 和 $f(t+\tau)$）的和．当光束的強度由一个对功率敏感的光度計加以测量时，光度計的讀数与 $f(t)+f(t+\tau)$ 的平方成比例，因之包含与自相关成比例的一項．換句話說，从干涉仪条紋的強度能求得自相关（对一种綫性变換为例外）．

所有这些在迈克耳逊的研究中都未明显指出．可以看出，如果对条紋作一富氏变換，干涉仪就为我們提供出光的功率譜，因之干涉仪实际上也就是一架分光計．它确实是我們所知道的最准确的分光計．

这类分光計只是在最近几年才开始应用，听說現在已成为精密测量的重要工具．所以要提到这一点的意义是：我現在提出的求自相关記录的技术同样可以用在分光計上，它提供一种方法使我們能把从分光計获得信息的界限加以推进．

让我們来討論从一根自相关曲綫求脑电波波譜的技术．設 $C(t)$ 是 $f(t)$ 的自相关曲綫．$C(t)$ 可以写成

$$C(t)=\int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i\omega t}dF(\omega) \qquad (10.02)$$

的形式．这里 F 經常是 ω 的增函数，或至少是 ω 的非减函数，我們将叫它为 f 的完全波譜（integrated spectrum）．这种完全波譜一般是由三部分組成、用加法联結起来．波譜的譜綫部分只是在一組数得清的点上增加．把这一部分除外，剩下的就是一个連續波譜．这个連續波譜是两个部分的和，其中一部分只在一个测度为零的集上增加，而另一部分却是絕对地連續的，它是一个可积正函数的积分．

从現在起，让我們假定波譜的头两部分——离散的部分和在测度为零的集上增加的連續部分——都忽略不計．在这种情况下，我們可以把 $C(t)$ 写成

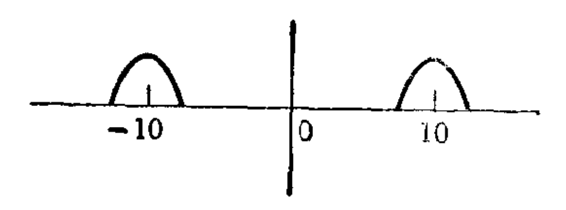
$$C(t)=\int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i\omega t}\phi(\omega)d\omega, \qquad (10.03)$$

其中 $\phi(\omega)$ 是譜密度．如果 $\phi(\omega)$ 是 L^2 的勒貝格类（Lebesgue class

L^2)，我們就能把 $\phi(\omega)$ 写成

$$\phi(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}C(t)e^{-2\pi i\omega t}dt. \qquad (10.04)$$

看了脑电波的自相关后，我們就会明白，波譜功率的主要部分是在 10 周的附近．因此，$\phi(\omega)$ 的形状将与下图类似．靠近10 和 -10 的两个峯是互为鏡象的．



从数值上进行富氏分析的途徑是很多的，其中包括利用积分仪和数值計算方法．对于这两种途徑来說，主峯在 10 和 -10 的附近而不是在 0 的附近，是不便于运算的． 好在有方法把調和分析轉移到零頻率的附近，这就大大減去了运算的工作．請注意

$$\phi(\omega-10)=\int_{-\infty}^{\infty}C(t)e^{20\pi it}e^{-2\pi i\omega t}dt. \qquad (10.05)$$

換句話說，如果我們把 $C(t)$ 乘以 $e^{20\pi it}$，我們的新的調和分析将在零頻率附近給出一个頻带，在頻率为 $+20$ 的附近給出另一个頻带． 如果我們作了这种乘法而且用取平均值的方法(等于用一个濾波器)去掉 $+20$ 的頻带，就会把我們的調和分析簡化到只在零頻率的附近．

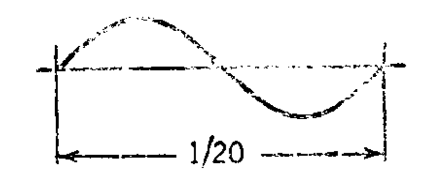
現在

$$e^{20\pi it}=\cos 20\pi t+i\sin 20\pi t, \qquad (10.06)$$

因此，$C(t)\cdot e^{20\pi it}$ 的实数和虛数部分分别为 $C(t)\cos 20\pi t$ 和 $iC(t)\sin 20\pi t$． 把这两个函数通过一个低通的濾波器（这相当于在 1/20 秒或更长一点的时間間隔內对它們取平均值)，我們就能把 $+20$ 附近的頻带去掉．

設我們有一曲綫其主要的功率都在頻率为 10 周的附近． 当我們把它乘以$20\pi t$ 的余弦或正弦时，我們将得到一条曲綫，它是两个部分的和，其中一部分是：(見右图)

另一部分是：(見 186 頁图)



当我們把第二条曲綫对长度为 1/10 秒的时間取平均值时，其值为零. 对第一条曲綫取平均值，其值为最大高度的一半. 因此，用修匀 $C(t)\cos 20\pi t$ 和 $iC(t)\sin 20\pi t$ 的办法，可以分别得到所有頻率集中在 0 附近的函数的实数部分和虚数部分的很好的近似，这个函数的分布頻率将在零附近，而 $C(t)$ 的波譜的一部分則在 10 附近. 現在設 $K_1(t)$ 是修匀 $C(t)\cos 20\pi t$ 的結果，$K_2(t)$ 是修匀$C(t)\sin 20\pi t$ 的結果. 我們希望得到

$$\int_{-\infty}^{\infty}[K_1(t)+iK_2(t)]e^{-2\pi i\omega t}dt$$
$$=\int_{-\infty}^{\infty}[K_1(t)+iK_2(t)][\cos 2\pi\omega t-i\sin 2\pi\omega t]dt. \quad (10.07)$$

既然这个式子是波譜，它就必須是实数. 因此它等于

$$\int_{-\infty}^{\infty}K_1(t)\cos 2\pi\omega t dt+\int_{-\infty}^{\infty}K_2(t)\sin 2\pi\omega t dt. \quad (10.08)$$

換句話說，如果作 K_1 的余弦分析和 K_2 的正弦分析并把它們相加，我們就得到 f 的置換波譜(displaced spectrum). 可以証明 K_1 是偶函数，K_2 是奇函数. 这就是說，如果作 K_1 的余弦分析并加上或減去 K_2 的正弦分析，我們将分別得到离中心頻率的距离为 ω 的右边和左边的波譜. 这种求波譜的方法，我們叫它成拍法(method of heterodyning).

当自相关曲綫局部地近似于正弦式曲綫，其周期例如說是 0.1 秒(如图 9 脑电波自相关曲綫所表現的那样)时，上述成拍方法的計算可以簡化. 我們以 1/40 秒为时間間隔来求自相关. 因此，我們取 0, 1/40 秒, 2/40 秒, 3/40[1]秒等值的序列并且改变那些分子为奇数的分数的符号. 我們依次在一个較长的統計游程上对这些时間值取平均而且得到一个与 $K_1(t)$ 接近相等的量. 如果我們在 1/40 秒, 3/40 秒, 5/40 秒等值上取同样的作法，交替地改变这些值的符号，象前面一样取平均值，我們就得到 $K_2(t)$ 的近似值. 由此以后的其他运算手續就很清楚了.

1) 原文在此处为 0, 1/20, 2/20, 3/20. 与前后文矛盾——譯者注.

这种作法所以正确是因为質量分布

在 $2\pi n$ 諸点上为 1

在 $(2n+1)\pi$ 諸点上为 -1

因为質量分布在其它各点都为 0，所以当把它用調和分析来表示时，将含有頻率为 1 的一个余弦部分而得不到正弦部分．同样，当一个質量分布

在 $(2n+1/2)\pi$ 为 1

在 $(2n-1/2)\pi$ 为 -1

在其它各处为 0

将含有頻率为 1 的正弦部分，沒有余弦部分．两种分布都含有頻率为 N 的部分；但是因为我們所分析的原来的曲綫在这些頻率上沒有或几乎沒有值，这些項也就不产生什么影响．这使成拍的运算大大簡化，因为我們唯一要乘的因子就是 $+1$ 或 -1．我們发現，当只有手工的工具时，成拍的方法在脑电波的調和分析中是很有用的方法，如果我們不用成拍而要进行調和分析的各种細节，就不可避免地要进行大量的工作．所有对脑波譜的調和分析的早期工作都是用成拍法作的．但是，后来証明可以用数字計算机，节省大量計算工作已不是主要的考虑，因此，后来在調和分析方面的大量工作都是不用成拍法而直接进行的．在沒有数字計算机的地方，仍然有許多这样的工作要做，因此，我并不認为成拍法在实际中已經沒有用了．

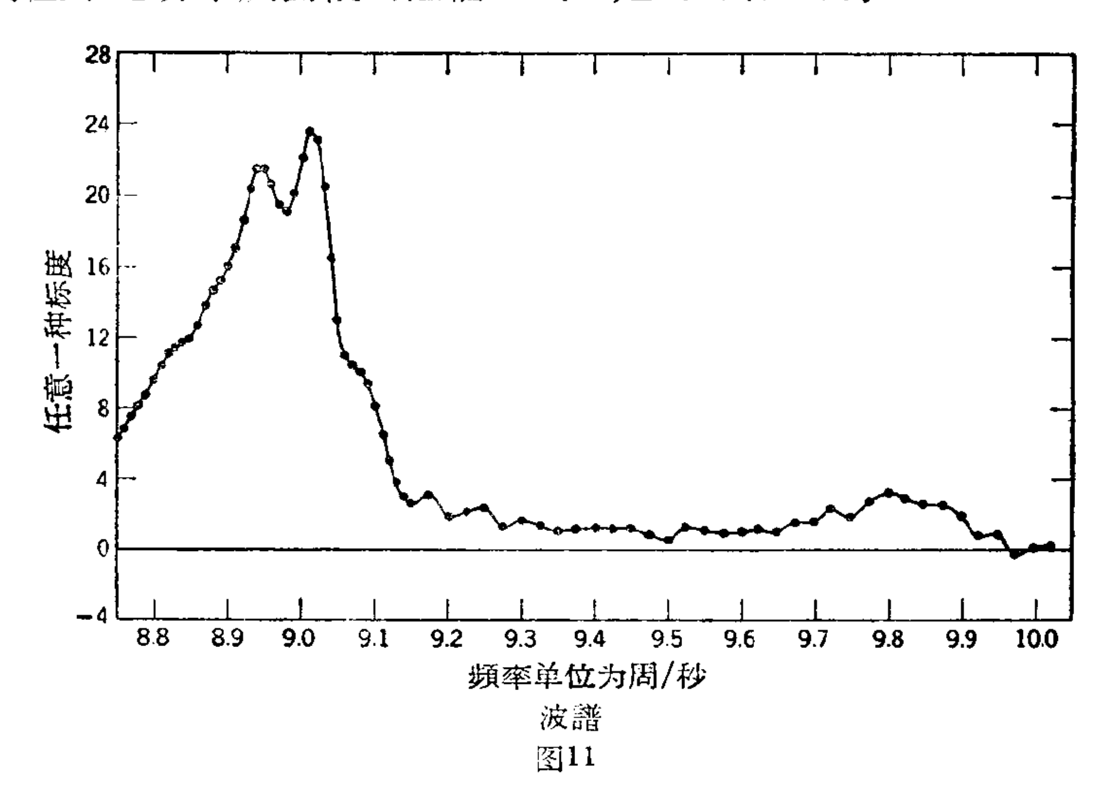
我在这里介紹一部分在我們的研究中得到的特殊的自相关因为自相关包括很长一串数据，它不适于在这里全部照搬出来，我們只拿出开始的在 $\tau=0$ 的附近和稍为往前的一部分．

图 11 表示对一条自相关曲綫进行調和分析的結果，这条曲綫的一部分曾表示在图 9 上．这里的結果是用一架高速数字計算机[1]获得的，但是我們发現这个波譜与我們早期靠手通过成拍法所获得的波譜之間非常一致，至少在波譜的高功率部分的附近是如

1) 用的是 M. I. T. 計算中心的 IBM-709.

此。

当我們审查这条曲綫时，发現功率在频率为 9.05 周/秒附近有一显著的下降。波譜下降的底点是非常明显的，它是脑电流描記术中出現过的各种量中最能以高度的精确性加以确定的一个客观量。在我們所得到的其它曲綫中也有某些指征，但是它們的可靠性在細节上都还有一些問題，这个曲綫在功率上的突然下降还跟着有一个很短的突然上升，因此在下降和上升之間曲綫上有一个坑。不管事情是否眞的如此，它強烈地暗示我們，成峯值状的功率对应于把功率从曲綫的低值区域拉走的那种拉力。



波譜

图11

在我們得到的波譜中，波峯的主要部分集中在約 1/3 周的范围內，这件事并沒有什么意义。有趣的是，四天以后另一张脑动电流图对同一对象所作的記录中，这个波峯的近似寬度仍然沒有变，更有意思的是，波峯的形状一点也沒有变。有理由相信，对于其它的对象，波峯的寬度将不同，也許还会窄一些。这个研究上的設想的彻底满意的証明还待进行。

非常希望我所提到的涉及这些暗示的工作能有人用更好的仪器作精密的測量，使它們能得到明确地証明或得到明确地否定。

我現在来談談取样問題．为此，需要介紹一下我关于函数空間积分[1]的早期工作中的某些概念．借助于这种工具，我們就能为波譜已給定的連續过程作一个統計模型．虽然这个模型不是产生脑电波的那个过程的精确复制品，但是，对于我們在前一章中提到的脑电波波譜所要求的那种均方根誤差来說，这个模型还是能提供足够的具有統計意义的信息．

我在这里要不加証明地提出一种实函数 $x(t, \alpha)$ 的某些性質，这种函数在我关于广义調和分析的論文[2]和其它地方都談到过．实函数 $x(t, \alpha)$ 依賴于从 $-\infty$ 到 ∞ 的变数 t 和从 1 到 0 的变数 α．它代表一个依賴于时間 t 和統計分布参数 α 的布朗运动的一个空間变数．

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dx(t, \alpha) \tag{10.09}$$

的式子对所有从 $-\infty$ 到 ∞ 的 L^2 勒貝格类的函数 $\phi(t)$ 都有确定值．如果 $\phi(t)$ 有一属于 L^2 的导数，10.09 式則成为

$$-\int_{-\infty}^{\infty} x(t, \alpha) \phi'(t) dt \tag{10.10}$$

因此，对于所有属于 L^2 的函数 $\phi(t)$，通过某一完全确定的极限过程，10.09 都有确定值．其它积分

$$\int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \cdots, \tau_n) dx(\tau_1, \alpha) \cdots dx(\tau_n, \alpha) \tag{10.11}$$

也可以依同样方法得确定值．我們所用到的基本定理是：

$$\int_0^1 d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau_1, \cdots, \tau_n) dx(\tau_1, \alpha) \cdots dx(\tau_n, \alpha) \tag{10.12}$$

通过令

$$K_1(\tau_1, \cdots, \tau_{n/2}) = \sum K(\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_n) \tag{10.13}$$

（这里的 τ_k 是通过令所有可能的各对 σ_K（如果 n 是偶数）两两相等的办法得到的）就变成

1) Wiener, N., "Generalized Harmonic Analysis", *Acta Mathematica*, **55**, 117—258(1930); *Nonlinear Problems in Random Theory*, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1958.

2) 同上注．

$$\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}K_1(\tau_1, \cdots, \tau_{n/2})d\tau_1, \cdots, d\tau_{n/2}. \quad (10.14)$$

如果 n 是奇数

$$\int_0^1 d\alpha\int_{-\infty}^{\infty}\cdots\int_{-\infty}^{\infty}K(\tau_1, \cdots, \tau_n)dx(\tau_1, \alpha)\cdots dx(\tau_n, \alpha) = 0 \quad (10.15)$$

另一个关于这些随机积分的重要定理是:如果 $\mathscr{F}\{g\}$ 是 $g(t)$ 的泛函,使得 $\mathscr{F}[x(t, \alpha)]$ 对 α 来說,是一个属于 L 的函数而且只依賴于 $x(t_2, \alpha) - x(t_1, \alpha)$,那末在每一个 t_1 上几乎对所有的 α 値

$$\lim_{A\to\infty}\frac{1}{A}\int_0^A\mathscr{F}[x(t, \alpha)]dt = \int_0^1\mathscr{F}[x(t_1, \alpha)]d\alpha \quad (10.16)$$

这就是拜尔霍夫(Birkhoff)各态历經定理,它已被作者[1]和其它人加以証明.

前面提到的 *Acta Mathematica* 上的論文已經証明,如果 U 是函数 $K(t)$ 的一个实值单式变換

$$\int_{-\infty}^{\infty}UK(t)dx(t, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty}K(t)dx(t, \beta), \quad (10.17)$$

其中 β 与 α 不同之处仅在于:β 經过(0,1)区間的測度不变的变換仍然成为自身.

現在設 $K(t)$ 属于 L^2,并設在普兰捷雷耳(Plancherel[2])意义上

$$K(t) = \int_{-\infty}^{\infty}q(\omega)e^{2\pi i\omega t}d\omega. \quad (10.18)$$

让我們来研究实函数

$$f(t, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty}K(t+\tau)dx(\tau, \alpha) \quad (10.19)$$

它代表一綫性变換器作用在一布朗运动的輸入上的反应.它的自

---

1) Wiener, N., "The Ergodic Theorem", *Duke Mathematical Journal*, **5**, 1—39 (1939); also in *Modern Mathematics for the Engineer*, E. F. Beckenbach (Ed.), McGraw-Hill, New York, 1956, 166—168.

2) Wiener, N., "Plancherel's Theorem", *The Fourier Integral and Certain of Its Applications*, The University Press, Cambridge, England, 1933, 46—71; Dover Publications, Inc., New York.

相关是

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}f(t+\tau,\alpha)\overline{f(t,\alpha)}\,dt. \tag{10.20}$$

根据各态历經定理,它对几乎所有的 α 值都有如下的值:

$$\int_0^1 d\alpha\int_{-\infty}^{\infty}K(t_1+\tau)dx(t_1,\alpha)\int_{-\infty}^{\infty}\overline{K(t_2)}dx(t_2,\alpha)$$
$$=\int_{-\infty}^{\infty}K(t+\tau)\overline{K(t)}dt. \tag{10.21}$$

因此,波譜几乎經常是

$$\int_{-\infty}^{\infty}e^{-2\pi i\omega\tau}d\tau\int_{-\infty}^{\infty}K(t+\tau)\overline{K(t)}dt$$
$$=\left|\int_{-\infty}^{\infty}K(\tau)e^{-2\pi i\omega\tau}d\tau\right|^2$$
$$=|q(\omega)|^2. \tag{10.22}$$

这就是那实际的波譜. 在取平均值的时間 A(在我們的例子中是 2,700 秒)上的抽样自相关将是

$$\frac{1}{A}\int_0^A f(t+\tau,\alpha)\overline{f(t,\alpha)}\,dt$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}dx(t_1,\alpha)\int_{-\infty}^{\infty}dx(t_2,\alpha)\frac{1}{A}\int_0^A K(t_1+\tau+s)\overline{K(t_2+s)}ds. \tag{10.23}$$

实际抽样波譜(resulting sampled spectrum)的时間平均几乎經常是

$$\int_{-\infty}^{\infty}e^{-2\pi i\omega\tau}d\tau\,\frac{1}{A}\int_0^A ds\int_{-\infty}^{\infty}K(t+\tau+s)\overline{K(t+s)}dt=|q(\omega)|^2. \tag{10.24}$$

这就是:抽样波譜与实际波譜有相同的对时間平均的值.

为了許多目的, 我們都对近似波譜感兴趣, 近似波譜只在 $(0, B)$上对 τ 积分,在我們前面提到的特例中, B 是 20 秒鈡. 許我們回想一下, $f(t)$ 是实函数,自相关是对称函数. 因此,我們可以用从 $-B$ 到 B 的积分来代替从 0 到 B 的积分:

$$\int_{-B}^{B}e^{-2\pi i\omega\tau}d\tau\int_{-\infty}^{\infty}dx(t_1,\alpha)\int_{-\infty}^{\infty}dx(t_2,\alpha)\frac{1}{A}\int_0^A K(t_1+\tau+s)$$

$$\times \overline{K(t_2+s)}ds \tag{10.25}$$

它有平均值为

$$\int_{-B}^{B} e^{-2\pi iu\tau}d\tau \int_{-\infty}^{\infty} K(t+\tau)\overline{K(t)}\,dt = \int_{-B}^{B} e^{-2\pi iu\tau}d\tau \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 e^{2\pi i\tau\omega}d\omega$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin 2\pi B(\omega-u)}{\pi(\omega-u)}\,d\omega. \tag{10.26}$$

近似波譜在$(-B, B)$上的平方值将是

$$\left|\int_{-B}^{B} e^{-2\pi iu\tau}d\tau \int_{-\infty}^{\infty} dx(t_1,\alpha)\int_{-\infty}^{\infty} dx(t_2,\alpha) \frac{1}{A}\int_0^A K(t_1+\tau+s)\overline{K(t_2+s)}ds\right|^2$$

它有平均值

$$\int_{-B}^{B} e^{-2\pi iu\tau}d\tau \int_{-B}^{B} e^{2\pi iu\tau_1}d\tau_1 \frac{1}{A^2}\int_0^A ds\int_0^A d\sigma\int_{-\infty}^{\infty} dt_1\int_{-\infty}^{\infty} dt_2$$

$$\times [K(t_1+\tau+s)\overline{K(t_1+s)}\,\overline{K(t_2+\tau_1+\sigma)}K(t_2+\sigma)$$

$$+K(t_1+\tau+s)\overline{K(t_2+s)}\,\overline{K(t_1+\tau_1+\sigma)}K(t_2+\sigma)$$

$$+K(t_1+\tau+s)\overline{K(t_2+s)}\,\overline{K(t_2+\tau_1+\sigma)}K(t_1+\sigma)]$$

$$=\left[\int_{-\infty}^{\infty} |q(\omega)|^2 \frac{\sin 2\pi B(\omega-u)}{\pi(\omega-u)}\,d\omega\right]^2$$

$$+\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_1)|^2d\omega_1\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_2)|^2d\omega_2$$

$$\times\left[\frac{\sin 2\pi B(\omega_1-u)}{\pi(\omega_1-u)}\right]^2\frac{\sin^2 A\pi(\omega_1-\omega_2)}{\pi^2A^2(\omega_1-\omega_2)^2}$$

$$+\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_1)|^2d\omega_1\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_2)|^2d\omega_2$$

$$\times\frac{\sin 2\pi B(\omega_1+u)}{\pi(\omega_1+u)}\,\frac{\sin 2\pi B(\omega_2-u)}{\pi(\omega_2-u)}\,\frac{\sin^2 A\pi(\omega_1-\omega_2)}{\pi^2A^2(\omega_1-\omega_2)^2}. \tag{10.27}$$

大家都知道，如果m代表一个平均值

$$m[\lambda-m(\lambda)]^2 = m(\lambda^2)-[m(\lambda)]^2. \tag{10.28}$$

因此，近似抽样波譜的均方根誤差将等于

$$\sqrt{\begin{aligned}&\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_1)|^2 d\omega_1\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega_2)|^2 d\omega_2\frac{\sin^2 A\pi(\omega_1-\omega_2)}{\pi^2A^2(\omega_1-\omega_2)^2}\times\\&\times\left(\frac{\sin^2 2\pi B(\omega_1-u)}{\pi^2(\omega_1-u)^2}+\frac{\sin 2\pi B(\omega_1+u)}{\pi(\omega_1+u)}\frac{\sin 2\pi B(\omega_2-u)}{\pi(\omega_2-u)}\right).\end{aligned}} \tag{10.29}$$

現在

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin^2 A\pi u}{\pi^2A^2u^2}du=\frac{1}{A}, \tag{10.30}$$

因此

$$\int_{-\infty}^{\infty}g(\omega)\frac{\sin^2 A\pi(\omega-u)}{\pi^2A^2(\omega-u)^2}d\omega \tag{10.31}$$

是 $1/A$ 乘以 $g(\omega)$ 的一个流动权重平均(running weighted mean). 当被平均的量在 $1/A$ 的小范围內近于常数(在此处这个假設是合理的)时，我們就可以把

$$\sqrt{\frac{2}{A}\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega)|^4\frac{\sin^2 2\pi B(\omega-u)}{\pi^2(\omega-u)^2}d\omega} \tag{10.32}$$

作为波譜任何点上均方根誤差的一个近似強值(approximate dominant of the root-mean-square error).

請注意如果近似抽样波譜在 $u=10$ 处有最大値，其値将是

$$\int_{-\infty}^{\infty}|q(\omega)|^2\frac{\sin 2\pi B(\omega-10)}{\pi(\omega-10)}d\omega, \tag{10.33}$$

对于平滑的 $q(\omega)$，它的値离 $|q(10)|^2$ 不会很远. 作为一个测量的单位，波譜对这値的均方根誤差将是

$$\sqrt{\frac{2}{A}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\frac{q(\omega)}{q(10)}\right|^4\frac{\sin^2 2\pi B(\omega-10)}{\pi^2(\omega-10)^2}d\omega}, \tag{10.34}$$

因此，它不会大于

$$\sqrt{\frac{2}{A}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin^2 2\pi B(\omega-10)}{\pi^2(\omega-10)^2}d\omega}=2\sqrt{\frac{B}{A}} \tag{10.35}$$

在我們所研究的情况下，它将是

$$2\sqrt{\frac{20}{2700}}=2\sqrt{\frac{1}{135}}\approx\frac{1}{6}. \tag{10.36}$$

如果我們假定"坑"的現象是眞实的，或者説，如果在頻率 9.05

周/秒附近我們的曲綫有一突然的下降，那就有几个生理学的問題值得考慮。值得考慮的三个主要問題是：我們所观察到的現象的生理机能；产生它們的生理机制；这些观察在医学上可能的应用。

請注意，一根清晰的频率綫等于一架准确的时鐘。大脑在某种意义上是一个控制和計算装置，因此很自然地我們要問，是否其它形式的控制和計算装置也用时鐘。的确大多数装置是用的。在这类装置中用时鐘是为了閘流(gating)的目的。所有这类装置都要在一組脉冲之間兼夹其它很多組脉冲。如果脉冲只是靠开关綫路来发送，脉冲計时的重要性是不大的，閘流也是不需要的。但是，使用这种脉冲传送方法的結果是，整个綫路在消息发送完以前不能作別的用处，这就造成装置的大部分在一个时間不定的周期內不能发揮作用。因此，人們希望在一部計算和控制装置中，消息是用組合开关信号来传送。这就立即可以把装置空出来作其它的用处。要做到这一点，必須把各組消息儲存起来，以便能同时把它們发出去，当它們还在机器中时，能把它們組合在一起。为此，閘流是需要的，而利用时鐘可以方便地实現这种閘流。

大家都知道，至少在較长的神經纖維的情况下，神經脉冲是由許多波峯来传載的，这些波峯的形状与产生它們的方法无关。这些波峯的組合是突触机构的一項功能。在这些突触中，一些进入的纖維联結着一根出去的纖維。当进入的纖維的适当組合在一个很短的时間間隔內"激发"时，出去的纖維也"激发"。在另外一些情况下，某些进入纖維有抑制作用，它們能絕对地阻止激发或者至少增加其它纖維的閾限。无論那种情况，一个短的組合周期是必須的，如果进入的消息不在这个短周期內，它們就不能組合起来。因此需要某种閘流机构，使进入的消息差不多是同时到达。否則突触就不能作为一个組合机构而起作用[1]。

---

1) 这特别是发生在皮質上的情况的一个簡化的图象，因为神經元的全或无动作要靠它自己有足够的长度，才能在神經元中以近似的形式重現进入脉冲的形状。但是，以皮質上的情况为例，由于神經元短，仍然存在整步的需要，当然这个过程是非常复杂的。

但是，我仍然希望进一步証明这种閘流是确实存在的．洛杉磯的加利福尼亚大学心理系林德斯来(Donald B. Lindsley)教授的某些工作与此有关．他作过一些对視覚信号的反应时間的研究．如所周知，当一个視覚信号达到时，它所刺激的肌肉的活动并不是馬上发生而有某种延迟．林德斯来教授指出这种延迟时間并不是一个常数，它似乎包含三部分．其中一部分的长度是常数，其它两部分看来是均匀地分布在約 1/10 秒上．它仿佛是中枢神經系統每 1/10 秒能够接收一个进入脉冲，也仿佛是从中枢神經系統輸出到肌肉的脉冲每 1/10 秒才有一个能到达．这就是閘流的实驗証明；与这 1/10 秒的閘流相联系的大脑的中央 α 律的近似周期也是 1/10 秒，这件事很可能不是偶然的．

中央 α 律的功能就是如此．現在的問題是这个律的产生机制．这里我們必須提出 α 律能用閃光来加強的事实．如果用周期約 1/10 秒的閃光射入眼中，大脑的 α 律就发生变化，直到出現一个与閃光有相同周期的強組分．沒有疑問，閃光在視网膜上产生一个电的閃爍，在中枢神經系統中几乎可以肯定也产生这种閃爍．

不管怎样，有一些証据指出，純粹电的閃爍可以产生与視覚閃爍相同的效应．这个实驗已經在德国作了．一个房間是由导电的地板和一块掛在天花板上的絕緣了的金属板作成．把研究对象放进房間，把地板和天花板联接在一部产生交流电势的发电机上，它的頻率接近每秒 10 周．被研究对象的經驗感覚是很紊乱的，它与一个类似的閃光所引起的紊乱感覚差不多．

自然，这些实驗需要在控制更好的条件下进行，也需要同时对研究对象作脑动电流图．但是，就已經作过的实驗来看，有迹象表明，視覚閃光所产生的效应可能由电閃爍通过靜电感应产生．

請注意，如果一个振蕩器的頻率能够被頻率不同的脉冲所改变，这个振蕩器的机构一定是非綫性的．一个按給定振蕩頻率动作的綫性机构只能产生頻率相同的振蕩，一般可以有某些位相和振幅的改变．对于非綫性机构，情况就不是这样，它可以产生許多

頻率的振蕩，它們是振蕩器頻率和所加扰动的頻率的不同級的和或差．对这样一种机构很容易移动它的頻率；在我們所研究的例子中，这种移动具有吸引的性质．很可能这种吸引是一种长时間的或长期的現象，对于短时間来說，这个系統仍然是近似于綫性．

設想一下这种可能性：大脑包含很多个頻率在 10 周/秒附近的振蕩器，在这些頻率的范围内，它們可以相互吸引．在这种情况下，各頻率象是拉扯在一起，形成一个或多个的小丛，至少形成波譜的某一个区域．被拉扯成这些小丛的頻率，一定在某些点上被扯开，这样就造成波譜上的裂縫，在那些地方的功率一定比我們原来希望的要低．这样的現象的确发生在个别人所发出的脑电波中，它的自相关曲綫表示在图 9 上，其中指明在頻率为 9.0 周/秒上功率有显著下降．早期研究者所用的分辨本領很低的調和分析[1]是不容易发現这个現象的．

为了使这个关于脑电波的起源的說明是有道理的，我們还须对大脑进行考察，看看所假定的振蕩器是否存在和它們的性质．麻省理工学院的罗逊勃里特教授告訴我，存在一种名叫后放电(after discharge)[2]的現象．当一道閃光送入眼睛后，与閃光有关的大脑皮质的电势并不馬上回到零，它在完全消失以前要經过一連串正的和負的位相．这个电势的形状可以用調和分析来描述，經分析发現功率的主要部分是在 10 周附近．这一事实至少与我們提出的脑电波自行組織的理論是不矛盾的．这些短时間的振蕩器(short-time oscillation)拉扯在一起变成連續振蕩的現象已經在其它的身体周期性中观察到，例如在許多生物中都观察到近于 23½

1) 我要指出，存在窄的中央律的一个証明已經由在英国布利斯托尔的伯尔敦神經学研究所(Burden Neurological Institude)的瓦尔特(W. Grey Walter)博士所得到．我不清楚他的方法的全部細节；但是，我懂得他所提到的現象实际上存在于他的脑电波的局部观察图(toposcopic picture)上，当从中心向外移动时表征頻率的光綫集中在一个比較窄的扇形內．

2) Barlow, J. S., "Rhythmic Activity Induced by Photic Stimulation in Relation to Intrinsic Alpha Activity of the Brain in Man", *EEG Clin, Neurophysiol.*, **12**, 317—326 (1960).

小时的周日律 (diurnal rhythm)[1]. 这个律可以通过改变外界环境被拉到 24 小时周日律处. 倘若生物的周日律能够通过外界环境的影响被吸引到 24 小时律处,它的自然律是否精确地是一个24小时律,从生物学上看来就不重要了.

有一个能够帮助弄明白我的关于脑电波的假說是否正确的有趣的实驗，它很可能要以螢火虫或其它象蟋蟀或青蛙这类动物为研究对象，因为这些动物能发出可看到或可听到的脉冲而且还能接收这些脉冲. 很多人认为在一枝树上的螢火虫以一致的动作发出閃光,这个明显的現象曾被解释为人眼的幻觉. 我听說东南亚有一些螢火虫这种現象非常显著,显著到很难用幻觉来解释. 这里,螢火虫有两重的动作. 一方面它是一个发射多少具有周期性脉冲的发射器,另一方面它有能接收这些脉冲的接收器. 会不会这里同样也发生我們所假定的頻率拉扯在一起的現象呢? 为此，对閃光作精确的記录是必須的，这种記录很适于作調和分析. 而且,可以給螢火虫照射例如象氖管这样的周期性閃光,这样我們就可以确定把其它頻率拉成自己的頻率是否是一种趋势. 如果情況的确如此,我們将力求获得一个关于这些天然閃光的精确記录,并对这个記录作一个类似我們对脑电波所作的那种自相关分析. 在实驗沒有作出以前,我不敢冒失地宣布它的結果,但这条研究路綫由于它很有希望而又不太困难是非常打动我的.

頻率吸引的現象在某些无生命的場合也有发生. 設有一組交流发电机，它的頻率是由一附属于原动机上的調速器来控制的. 这些調速器使各交流发电机的頻率保持在較窄的頻率区以內. 設各发电机的輸出端并联在汇流条上，电流从汇流条流到外負荷上去,外負荷由于电灯的开灭等原因多少要发生随机的起伏. 为了避免在老式的中央电站中发生的那种开关电閘的人为問題，我們假定发电机的开关是自动化的. 当一部发电机的速度和位相发动

---

1) *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, Volume XX (Biological Clocks), The Biological Laboratory, Cold Spring Harbor, L., N. Y., 1960.

到与系統的其它发电机的速度和位相足够接近的时候，一个自动装置就会把它接到汇流条上去，如果由于某些偶然的原因，它离开正常的頻率和位相太远，一个类似的裝置将自动地把它关掉. 在这样一个系統中，如果一部发电机跑得太快因而頻率太高，它就要分担大于它正常要分担的部分的負荷，如果一部发电机跑得太慢，它就只分担小于正常部分的負荷. 結果是在各发电机的頻率之間有一种吸引. 整个的发电系統仿佛有一个眞正的調速器在起作用，它比各个发电机的調速器还要精确，它是由这些調速器和发电机之間的电的相互作用所共同組成的. 发电系統的精确頻率調节，至少部分是由于这种电的相互作用的結果. 也是由于它的作用，具有高精确度的电鐘的应用才有可能.

因此，我建議平行于我們对脑电波的研究，对发电系統的輸出同时展开实驗的和理論的研究.

下述事实历史地看是有趣的：在交流电机工程的早期发展中，曾經尝試把現代发电系統中所用的这种常电压型的发电机串联起来，而不是象現在这样并联起来. 但是后来发現各个发电机在頻率方面的相互作用是排斥而不是吸引. 結果是这样的系統不可能稳定，除非每个发电机的轉动部件都用一根共同的軸或用齿輪把它們固定地联接起来. 另一方面，发电机的汇流条并联联接証明有一种固有的稳定性，它使得把不同电站的发电机統一成一个单一的自足的系統. 用一个生物学上的类比，并联系統是一个比串联系統更能使状态稳定的系統，因此它被保存下来，而串联系統通过自然选择被淘汰.

一个引起頻率吸引的非綫性相互作用能产生一个自行組織系統，我們討論过的脑电波和交流网絡的例子就是如此. 这种自行組織的可能性决不限于这两种現象所属的低頻的范围. 下面来研究頻率在比如紅外光或雷达波段的自行組織系統.

如我們在前面已說过的，生物学的主要問題之一就是：組成基因、病毒和产生癌的某种特殊物質是通过什么方式，从不具有这种特异性的，象氨基酸和核酸的混合物中生殖自己. 通常所作的解释

是，这些物质的一个分子作为样板而起作用，要組成这种物质的較小的分子把自己松开，按照样板分子的要求結合成一个与它相同的大分子．这大都是一种形象的說法，只不过是对生命的基本現象的另一种描述方法，不过是說其它的大分子是以現存的大分子作模型来形成的．但是这种形成有一个过程，这是一个动力学的过程，一个包括各种力和力的平衡的过程．描述这种力的一个完全可能的途径是：分子特异性的积极承担者可能是分子幅射的頻率式样，这种幅射的一个重要部分可能是在紅外电磁頻率或更低的頻率范围．一种病毒物质在某种情况下可能发射紅外振蕩，这种振蕩具有促进从沒有特异的氨基酸和核酸原料中形成病毒分子的能力．很可能这种現象可以看作是頻率的一种相互吸引的作用．因为整个事情还待証明，有些細节也还沒有完成，我不打算提出更明确的东西．检驗这些論点的明显方法就是研究大块病毒物质(例如烟草鑲嵌病毒的結晶)的吸收和发射光譜，并且观察这些頻率的光綫对在适当的营养物质下从現存病毒生产更多的病毒的影响．我所說的吸收光譜指的是那种几乎一定会存在的吸收現象；至于发射光譜，我指的是某种熒光現象．

所有这些研究都涉及到在我們經常遇到的強連續光譜的背景下如何仔細来考察光譜的高度精密的方法．我們已經知道，在脑电波的微观分析中也遇到同样的問題，干涉分光計（interferometer spectrography）的数学与我們这里所要用的数学实际上是相同的．因此，我慎重建議在研究分子光譜时，特别是在研究象病毒，基因和癌的光譜时，試驗一下这个方法的效力．预言这种方法对純粹生物学研究和医学的全部价値还为时过早，但是我非常希望它們或許会被証明在这两个領域有极大的价值．